

Einige meteorologische Aspekte der Windkraftnutzung

Stefan Emeis
stefan.emeis@kit.edu

INSTITUTE OF METEOROLOGY AND CLIMATE RESEARCH, Atmospheric Environmental Research



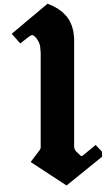
Einige für die Windkraftnutzung relevante meteorologische Aspekte

Tagesgang der Windgeschwindigkeit und der thermischen Schichtung,
low-level jets, Vertikalprofile

Strömungen über komplexem Gelände und deren Messung

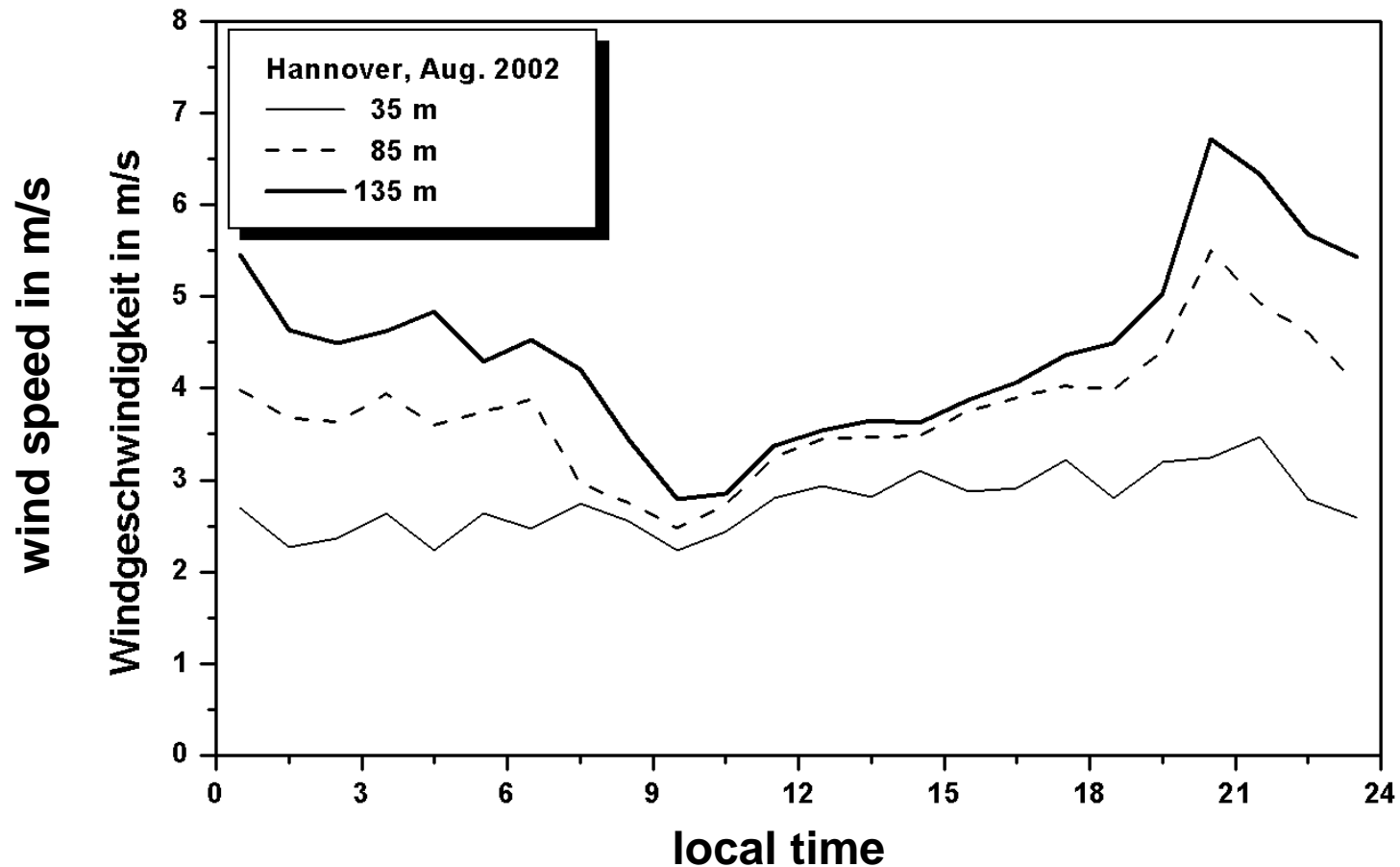
marine Grenzschicht (offshore)

Windparks, onshore und offshore

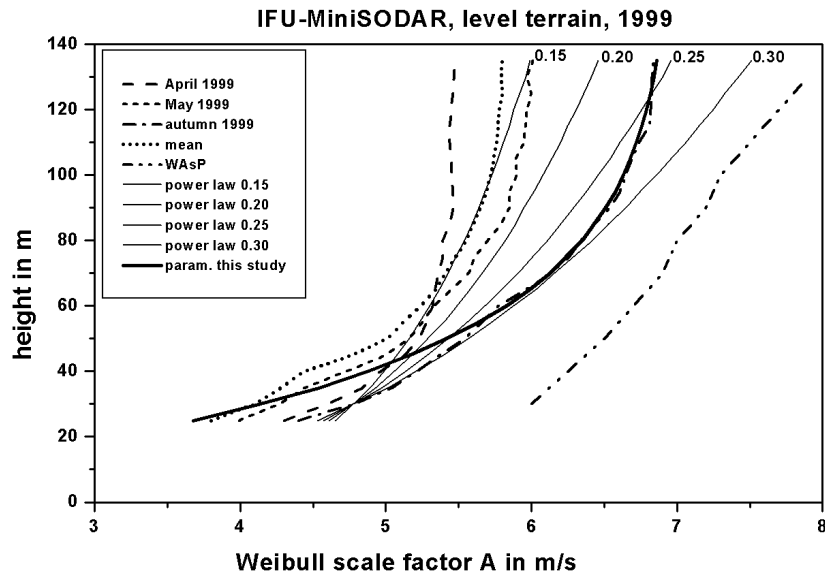


Tagesgang der Windgeschwindigkeit und der thermischen Schichtung,
low-level jets, Vertikalprofile

Monatsmittel des Tagesgangs der Windgeschwindigkeit August 2002, 17 Nächte mit LLJ

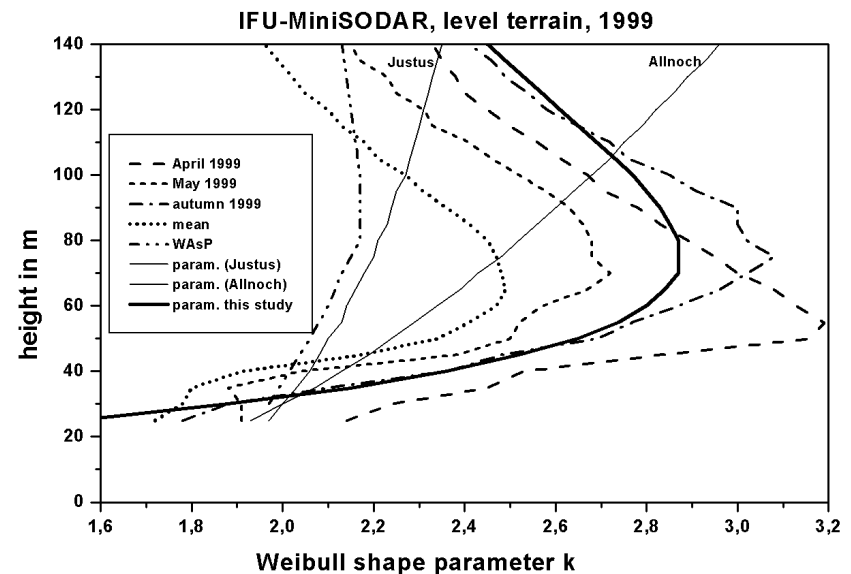


Vertikalprofile der Parameter der Weibull-Verteilung im Flachland



Weibull-Skalenparameter
($A_0 = 6,98 \text{ m/s}$, $\gamma = 0,03$)

$$A(z) = A_0 \left(1 - e^{-\gamma z}\right)$$



Weibull-Formparameter
($z_A = 10 \text{ m}$, $z_m = 75 \text{ m}$, $c_2 = 0.06$)

$$k(z) - k_A = c_2 (z - z_A) \exp\left(-\frac{z - z_A}{z_m - z_A}\right)$$

Wieringa (1988)

Ansätze für durchgehende Windprofilbeschreibung in der nicht neutral-geschichteten Grenzschicht (Emeis et al. 2007 basierend auf Etling 2002):

$$u(z) = \begin{cases} u_* / \kappa (\ln(z / z_0) - \Psi_m(z / L_*)) & \text{for } z < z_p \\ u_g (-\sin \alpha_0 + \cos \alpha_0) & \text{for } z = z_p \\ u_g [1 - 2\sqrt{2}e^{-\gamma(z-z_p)} \sin \alpha_0 \cos(\gamma(z-z_p) + \pi/4 - \alpha_0) + 2e^{-2\gamma(z-z_p)} \sin^2 \alpha_0]^{1/2} & \text{for } z > z_p \end{cases}$$

mit den externen Parametern z_0 , L_* und u_g
und den internen Parametern α_0 , z_p und γ .

mit den externen Parametern z_0 und u_g und den internen Parametern α_0 , z_p und γ .

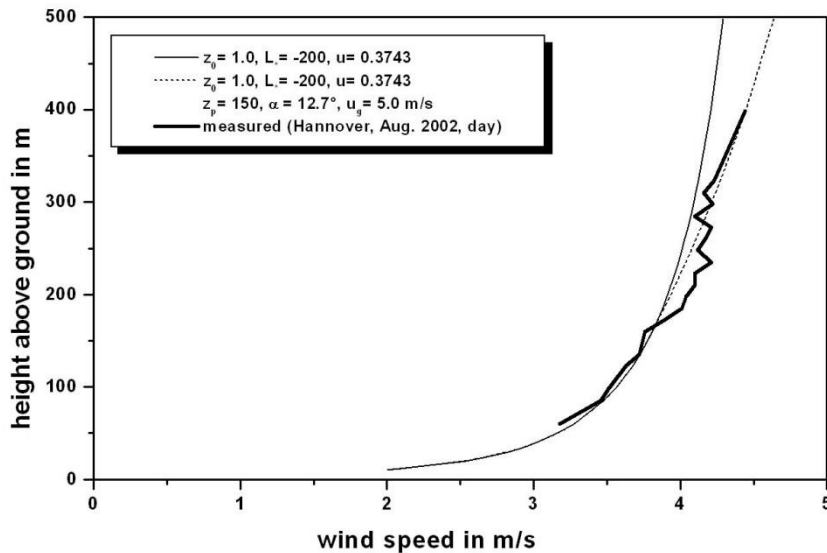
$$u_* = 2 \left| u_g \right| \gamma \kappa z_p \sin \alpha_0$$

$$\alpha_0 = \arctg \frac{1}{1 + 2\gamma z_p \ln(z_p / z_0)}$$

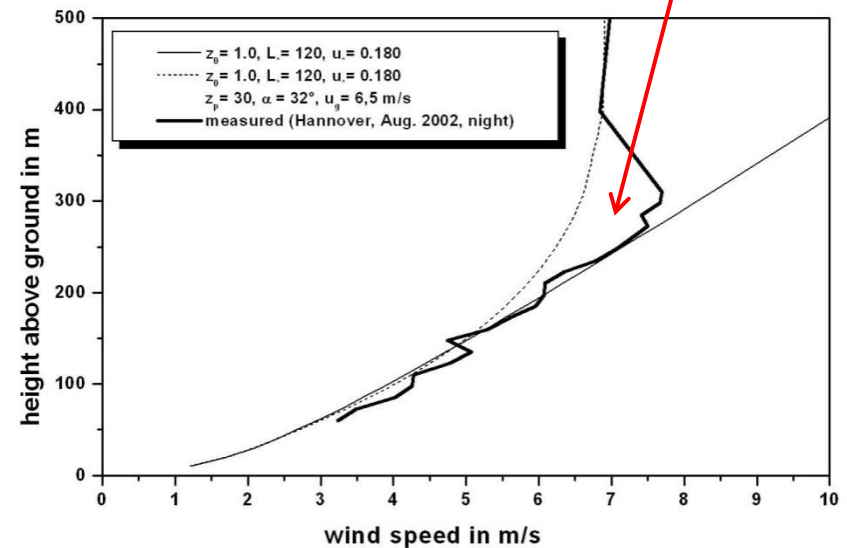
$$\gamma = \sqrt{\frac{f}{2\kappa u_* z_p}}$$

Dieser Ansatz wurde von Optis et al. (2014; BLM 153, 497-514) bestätigt und erweitert.

tagsüber



nachts

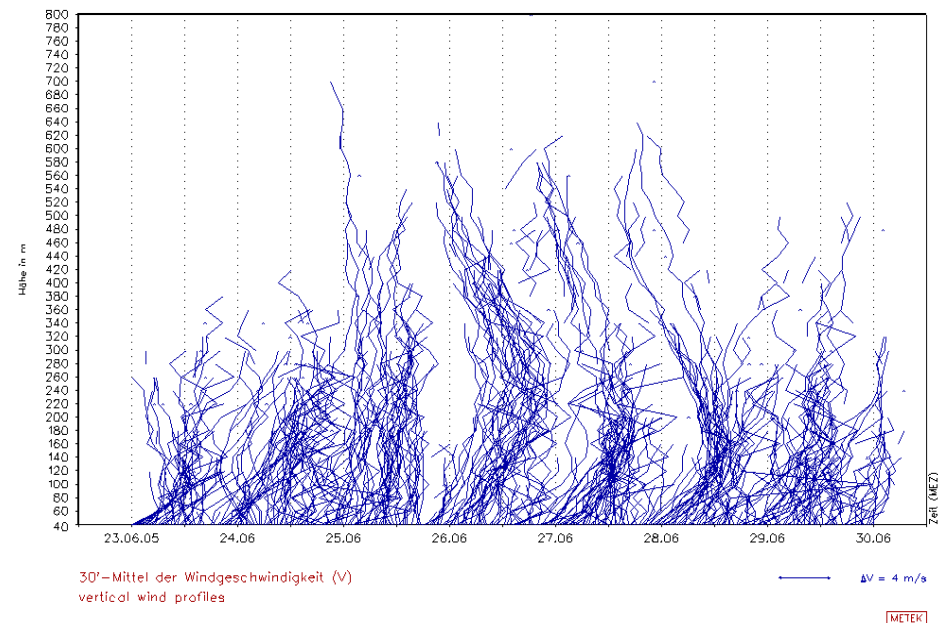
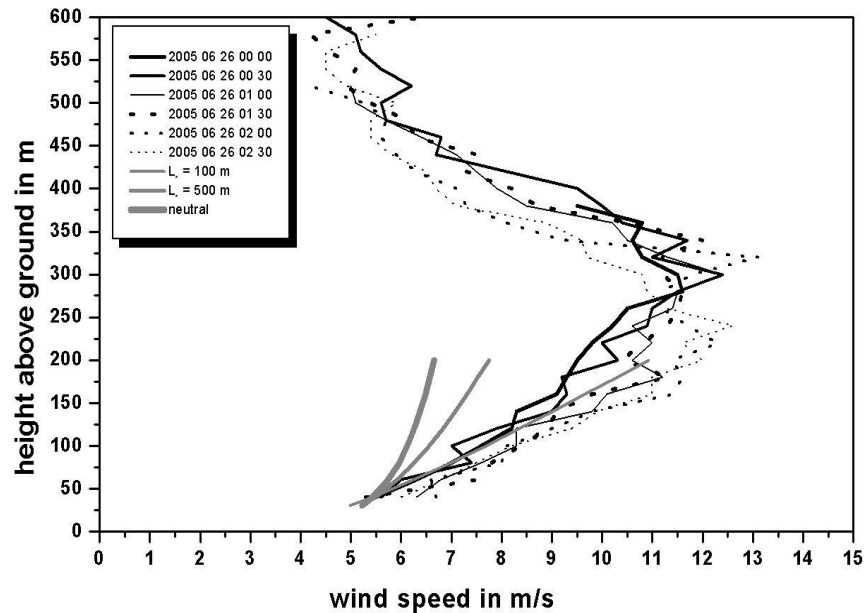


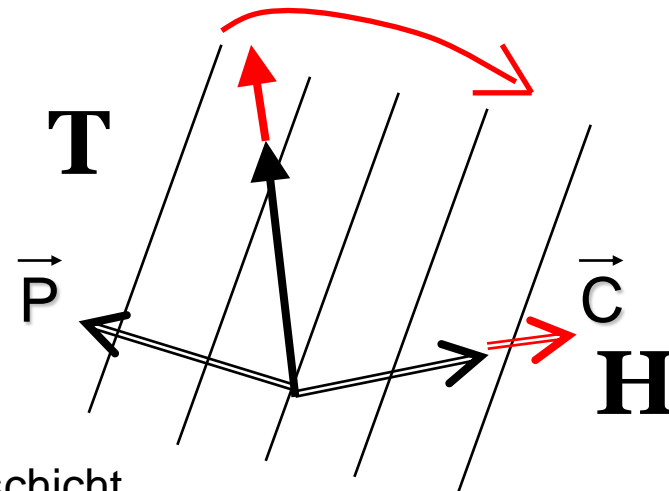
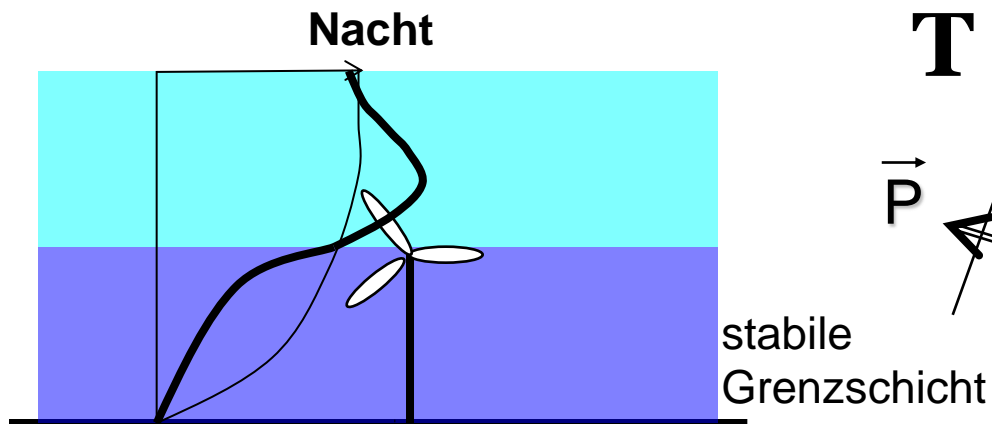
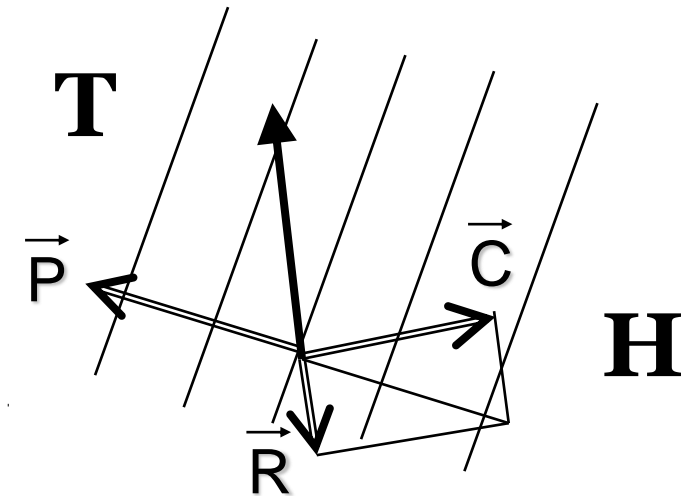
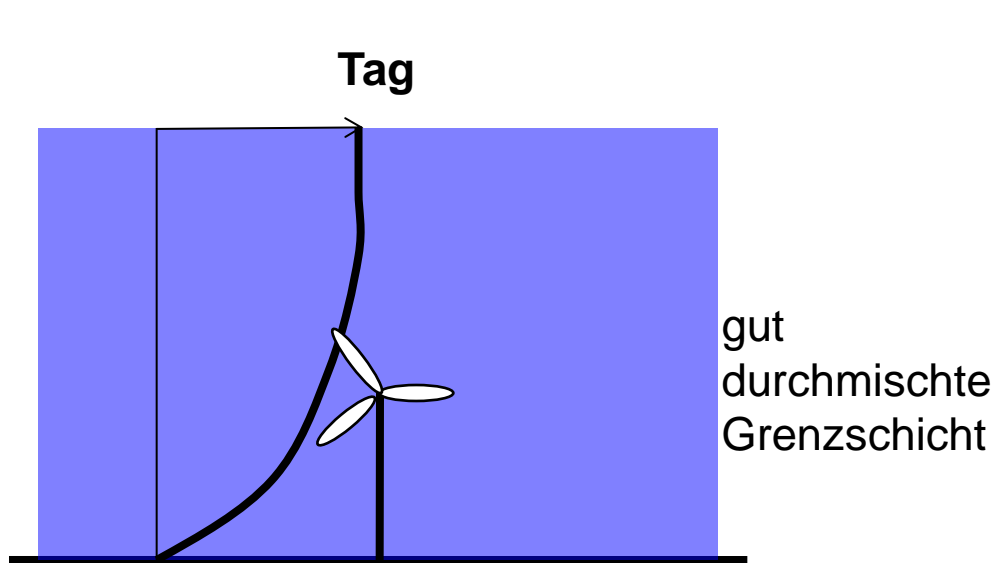
die gestrichelte Kurve zeigt die durchgehende Profilfunktion,
die durchgezogene Kurve ein nach oben fortgesetztes logarithmisches Profil

Low-level jet Beobachtung mit SODAR

vertikale Windprofile (30 min-Mittel)
26. Juni 2005

23.-30. Juni 2005

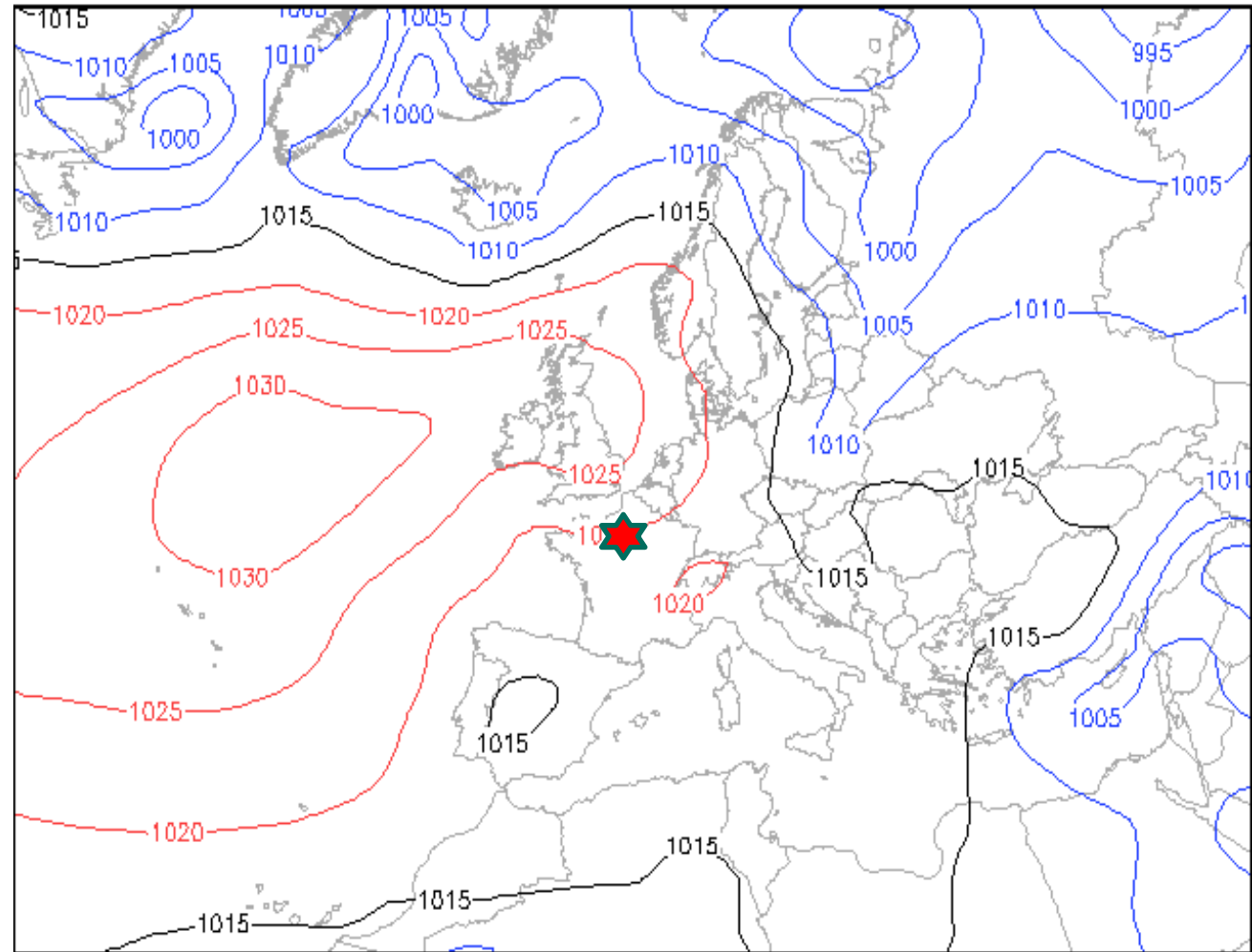




**Bodendruck
00 GMT**

26. Juni 2005

**Stern: Ort der
Beobachtung des
LLJ**



Bodendruck GFS (hPa)

So 26.06.05 00 GMT (Sa 00 + 24)

WetterOnline

LLJ-Häufigkeit über Hannover für 20 Monate in den Jahren 2001 bis 2003

in knapp 22 % aller Nächte

Großwetterlagen:

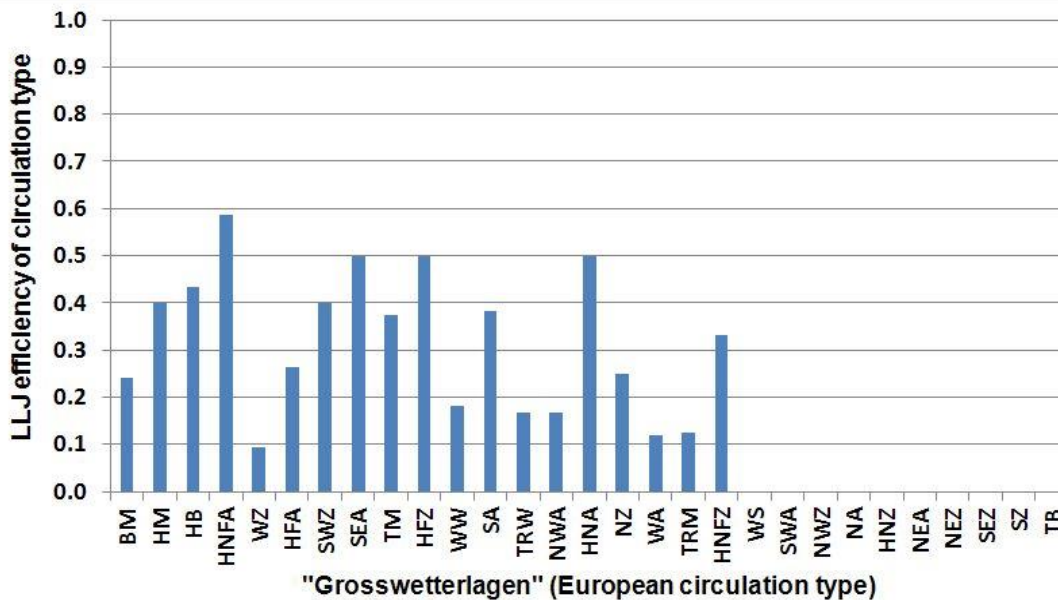
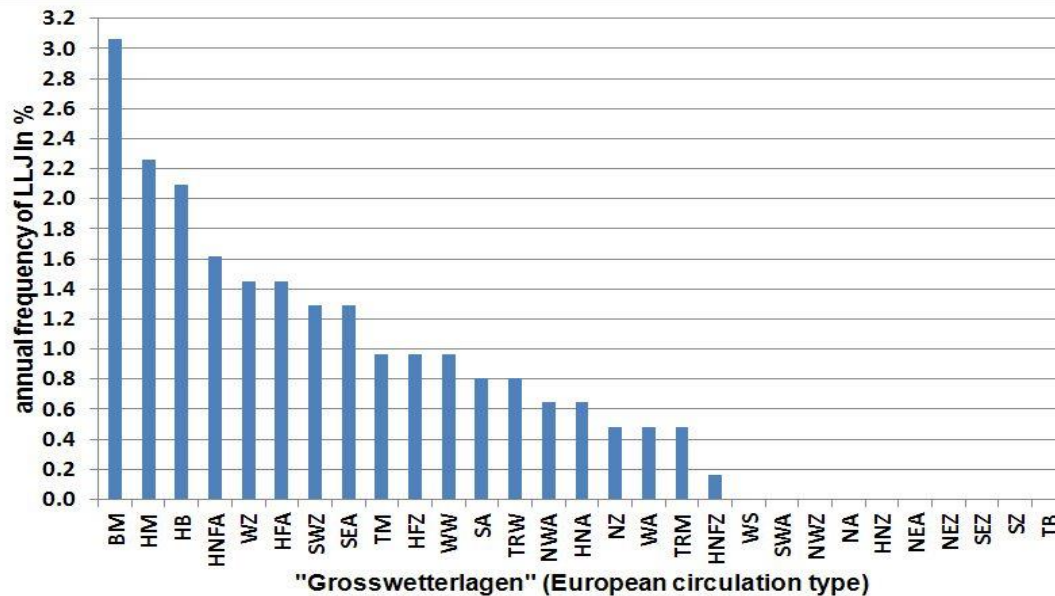
BM Brücke Mitteleuropa
HB Hoch Britische Inseln
HM Hoch Mitteleuropa

...

HFZ Hoch Skandinavien
HNFA Hoch Nordatlantik

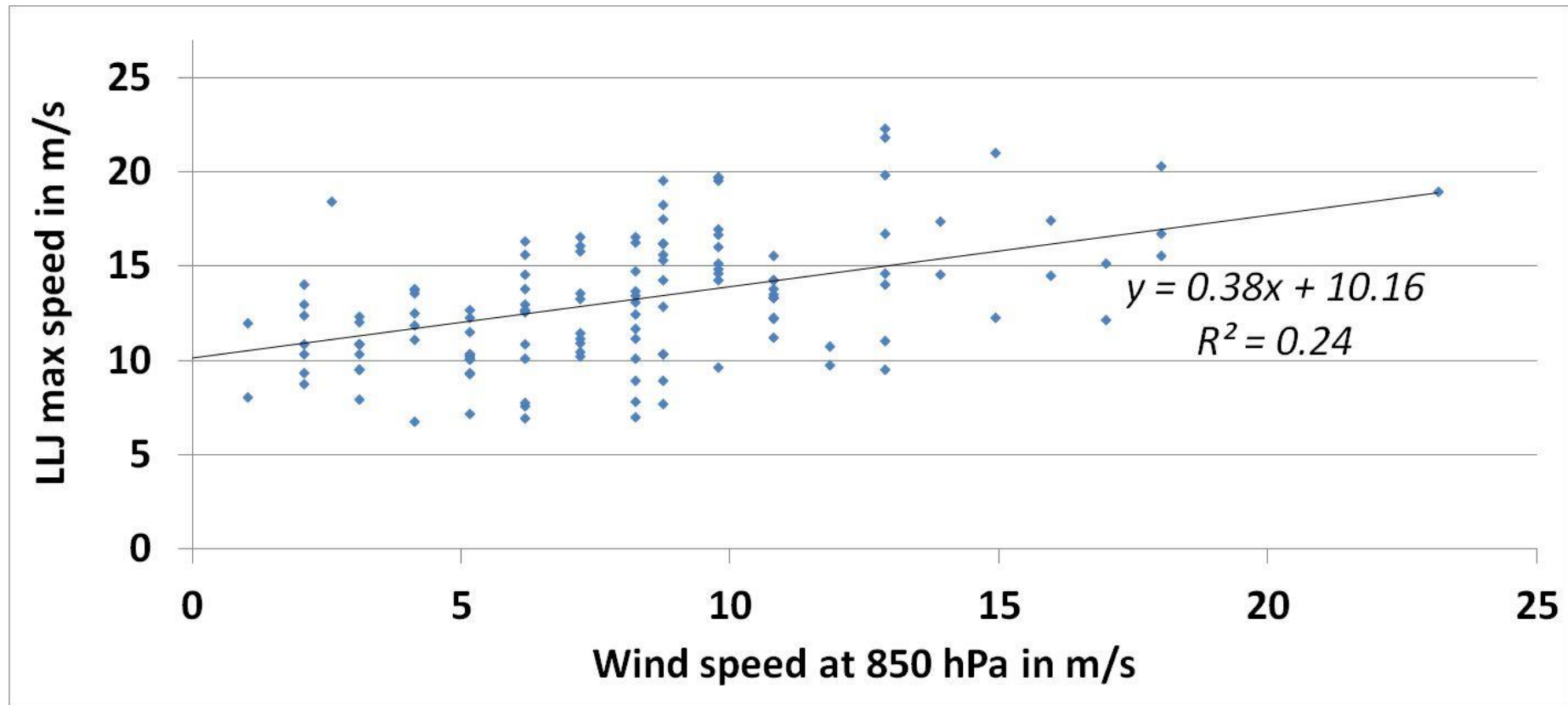
...

“Effektivität” einen
LLJ über Hannover
hervorzubringen

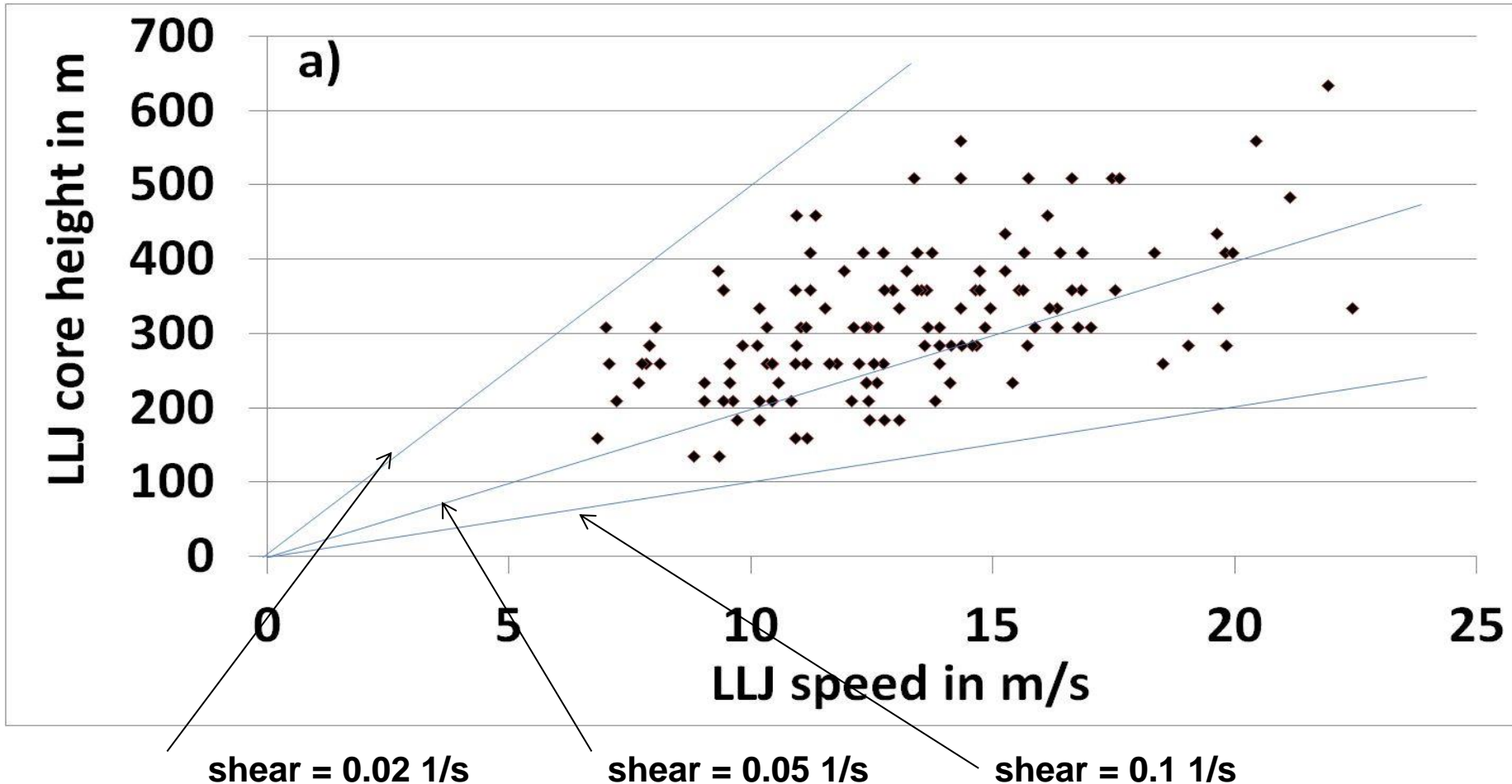


maximale Windgeschwindigkeit im LLJ und antreibende Druckgradientkraft

erklärt die Maximalgeschwindigkeit nur schlecht



Höhe in m und Windgeschwindigkeit im Kern des LLJ in m/s
über Hannover 5.2001 – 4.2003
- relativ gut korreliert -



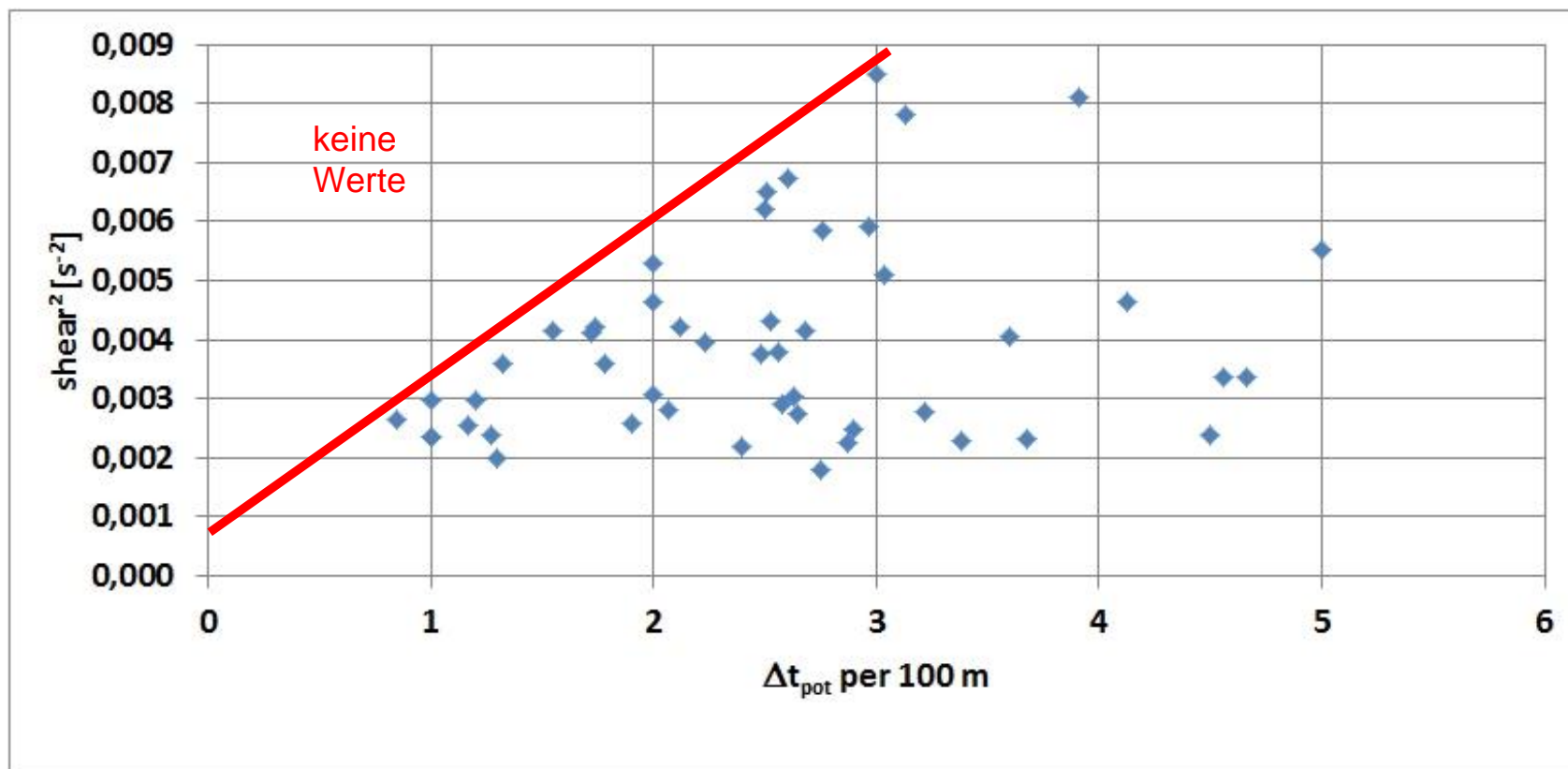
Critical Richardson number is limiting condition for vertical shear
(mechanical turbulence is generated if Ri falls below Ri_{krit})

$$Ri_{krit} = \frac{g \partial \Theta / \partial z}{\Theta (\partial u / \partial z)^2} \approx 0.25$$

$\Theta(z)$	potential temperature
g	gravitational acceleration
$u(z)$	wind speed
z	vertical coordinate

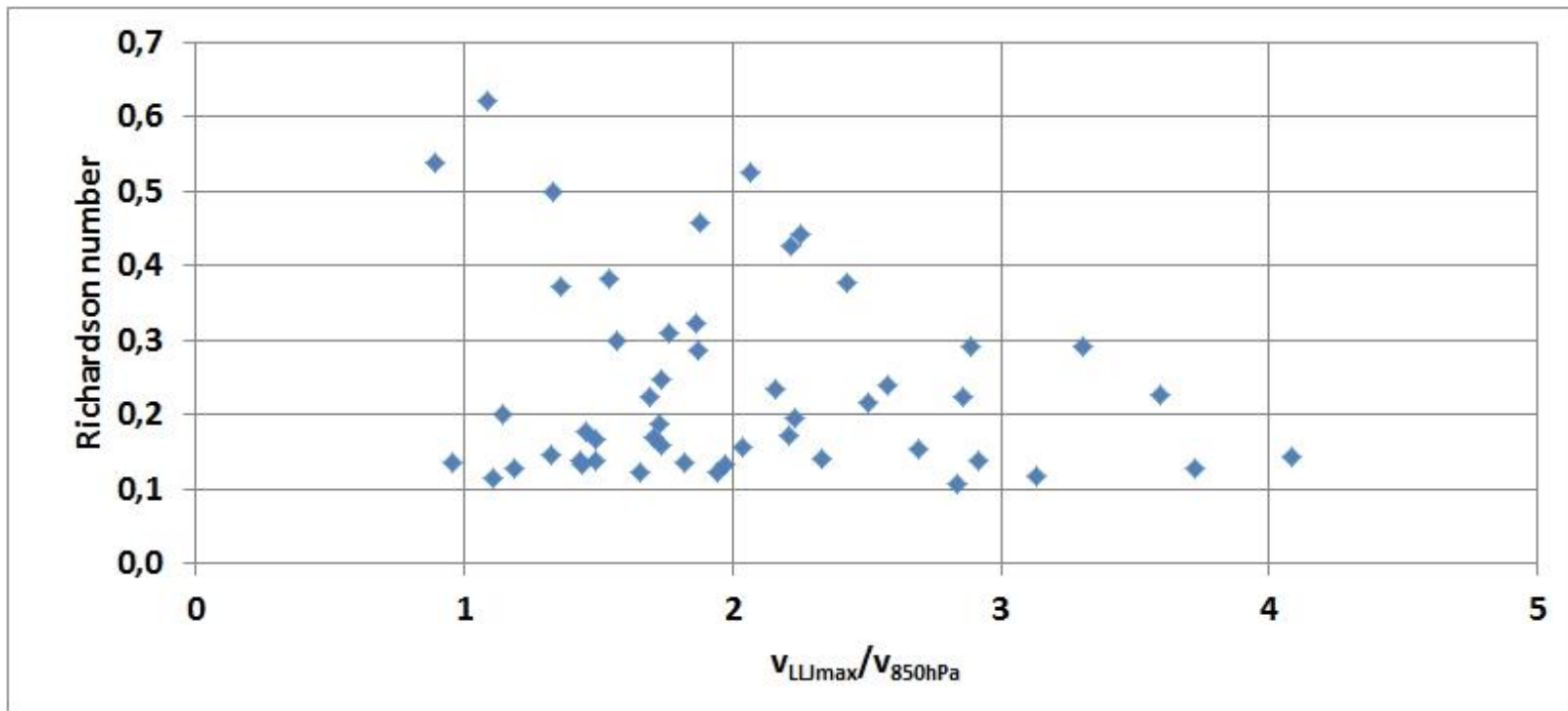
RASS Beobachtungen Augsburg

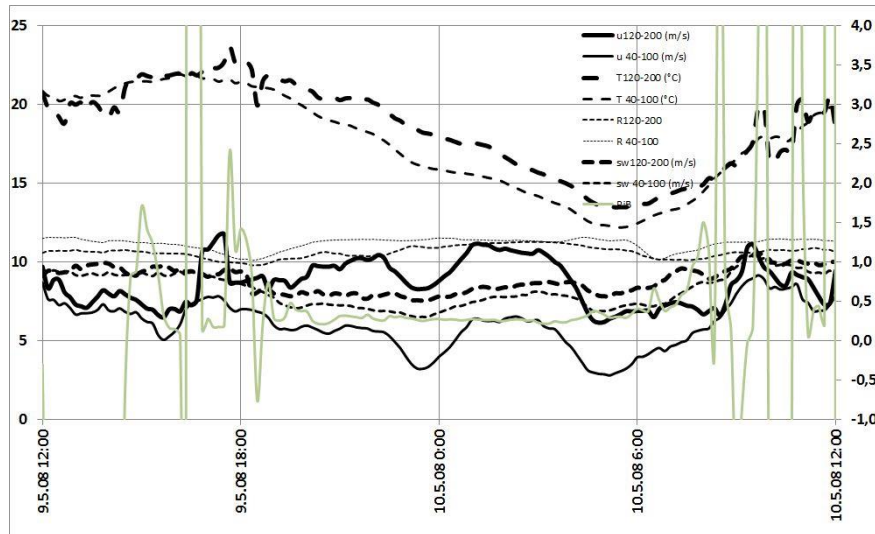
Korrelation von Scherung und Temperaturgradient



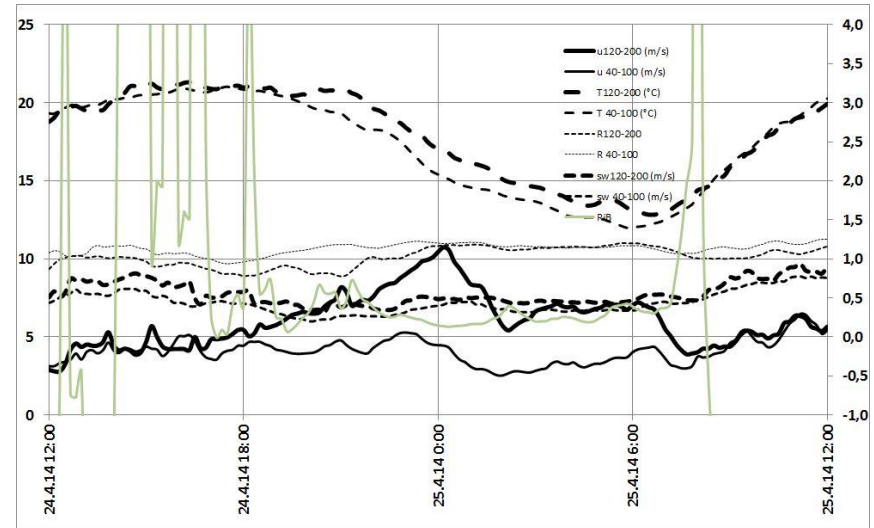
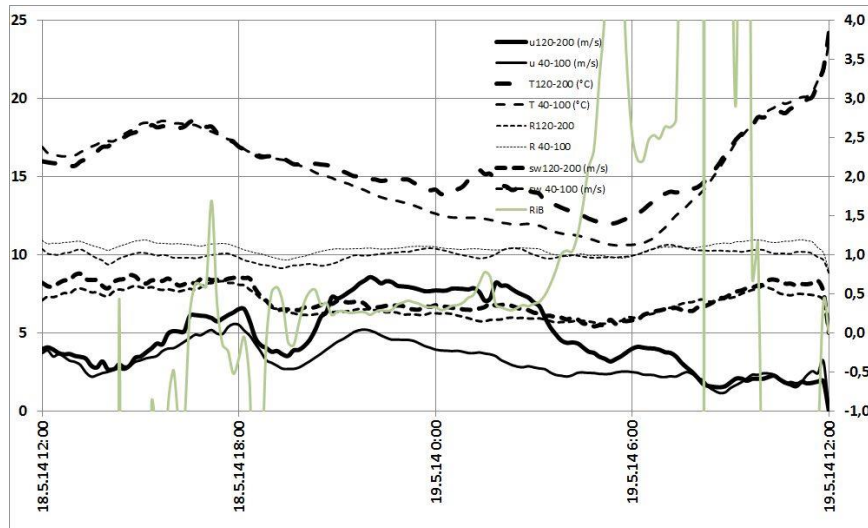
RASS Beobachtungen Augsburg

Richardson-Zahl bei LLJ Ereignissen

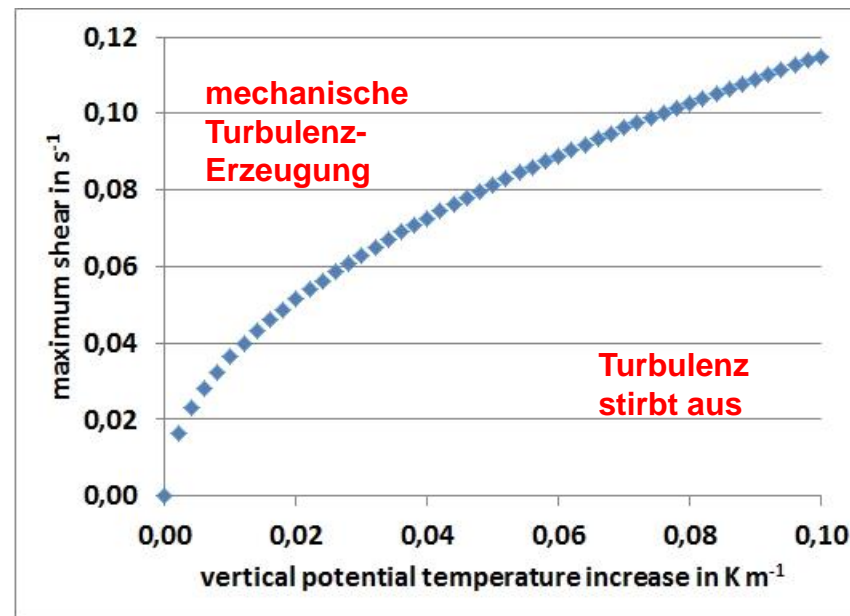




**kritische Richardson-Zahl
als limitierende Größe
bei der Ausbildung nächtlicher LLJ**



maximal mögliche Scherung für eine vorgegebene $Ri_{krit} = 0,25$



$$Ri_{krit} = \frac{g \partial \Theta / \partial z}{\Theta (\partial u / \partial z)^2} \approx 0.25$$

Zusammenfassung zu LLJ

Klimatologie

- LLJ in gut 21% aller Nächte (in de Bilt ca. 20%)
- Kern zwischen 135 und 650 m Höhe
- LLJ Kerngeschw. 7 bis 23 m/s (Höhe und Geschw. sind korreliert)

Zusammenhang mit den treibenden Kräften

- 850 hPa Wind zwischen 1 und 18 m/s (Kottmeier et al. 1983: 6-11 m/s)
- LLJ-Kerngeschw. schwach positiv korreliert mit 850 hPa wind (Maximum bei 13 m/s)
- LLJ-Kerngeschw. schwach negativ korreliert mit 850 hPa relative Feuchte

dynamischer Einfluss auf Windturbinen

- Scherung in der Rotorebene bei 0.04 bis 0.08 1/s
- Richtungsscherung bei 0.1 bis 0.2 Grad/m

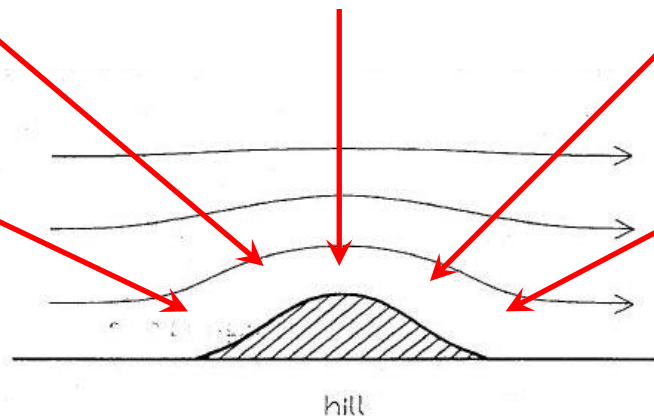
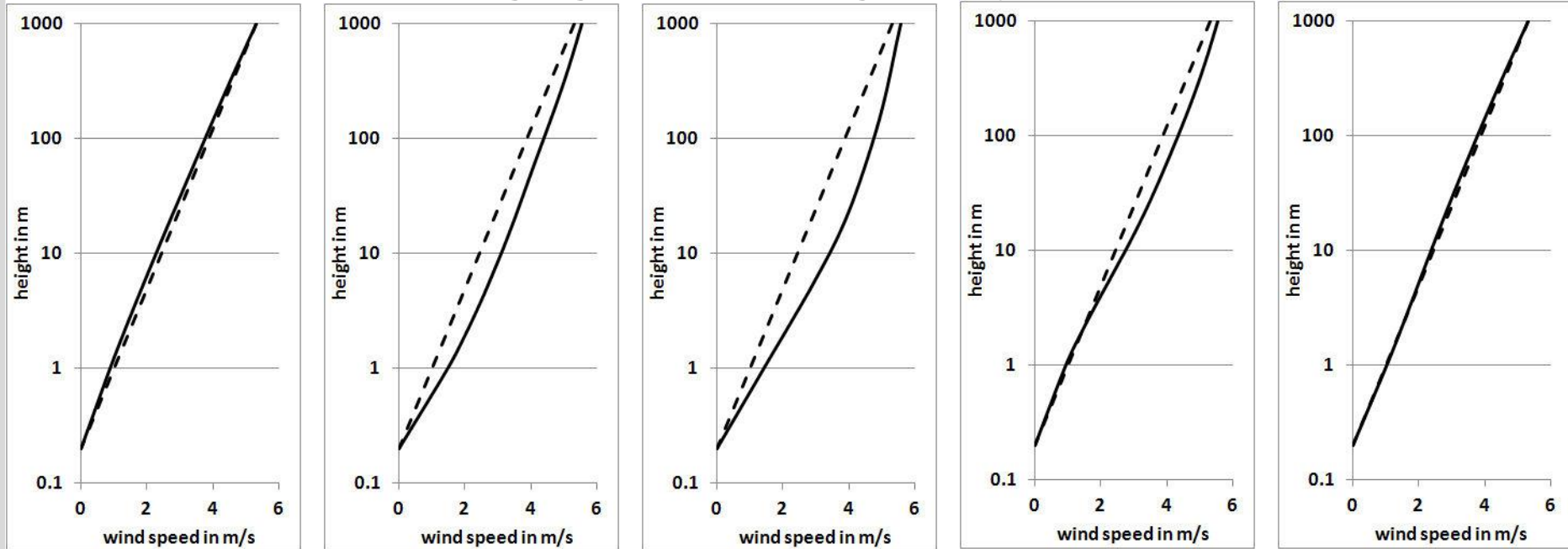
allgemein

- Scherung unterhalb der LLJ wächst bis maximale Scherung erreicht ist (relevanter Parameter: kritische Richardson-Zahl ca. 0,1)

2

Strömungen über komplexem Gelände und deren Messung

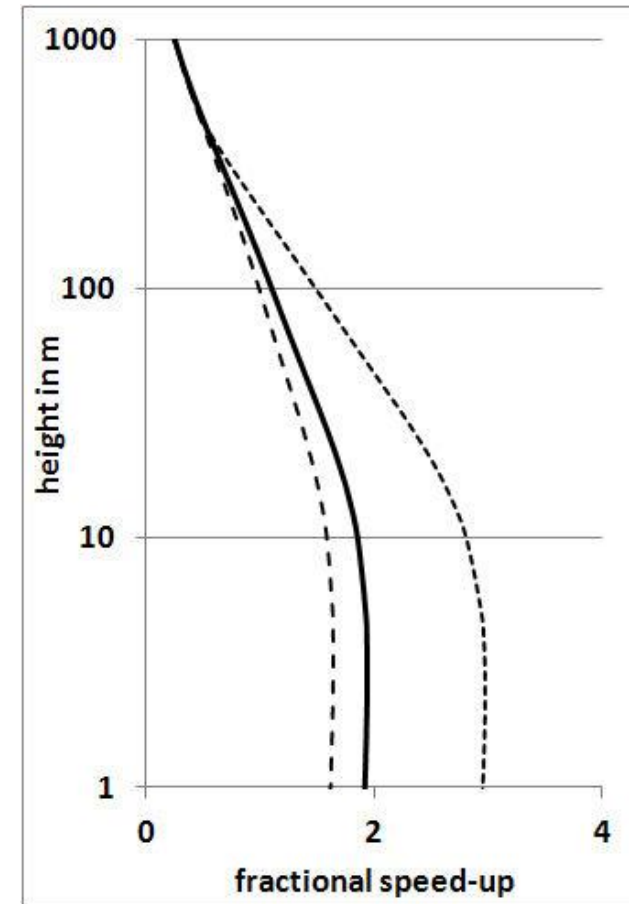
Beschleunigung über einem Hügel (analytisches Modell)



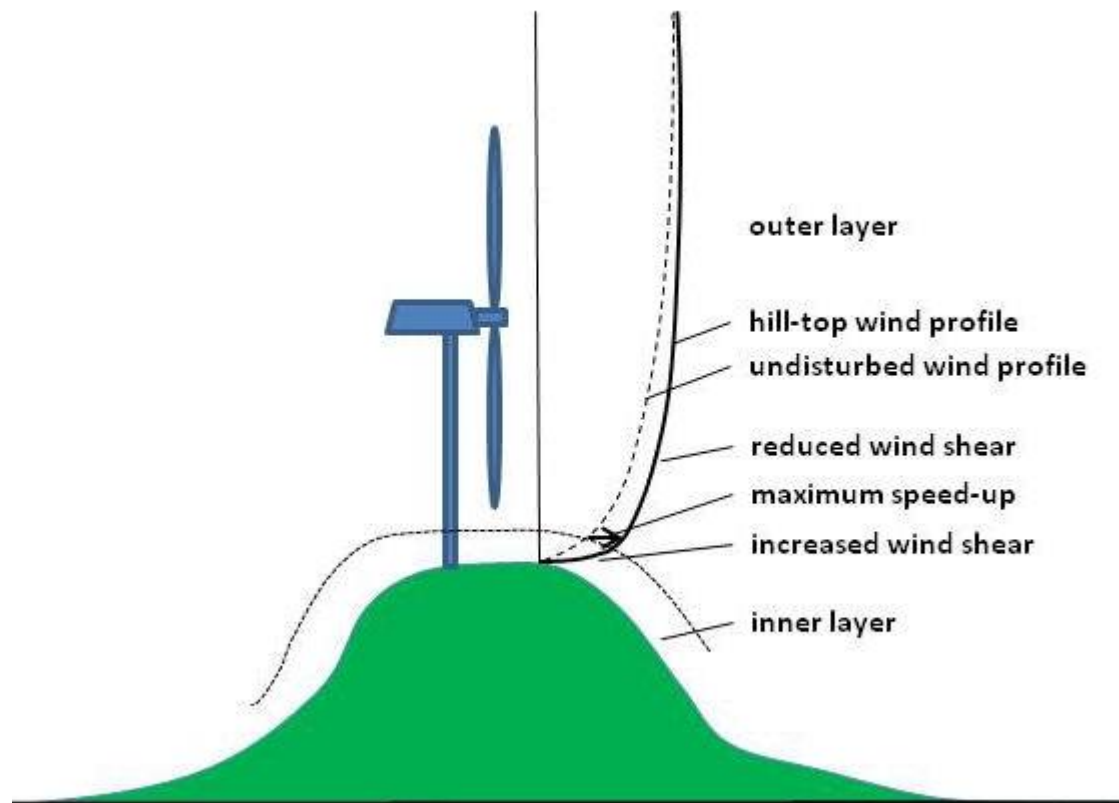
Beschleunigung über einem Hügel (analytisches Modell)

als Funktion der thermischen Stabilität

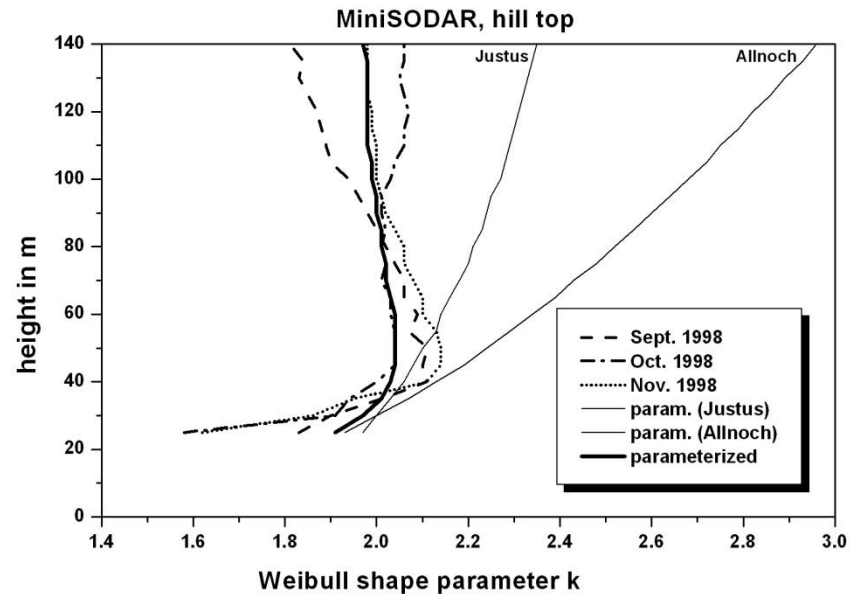
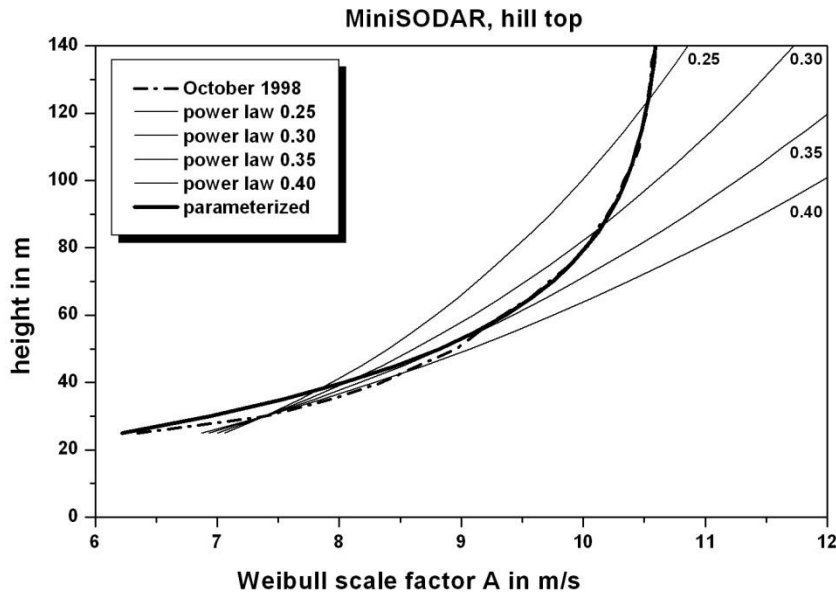
punktiert:	stabil
durchgezogen:	neutral
gestrichelt:	instabil



Beschleunigung über einem Hügel



Weibull-Parameter über einer Hügelkuppe



Weibull-Skalenparameter
($A_0 = 10,67 \text{ m/s}$, $\gamma = 0,035$)

$$A(z) = A_0 \left(1 - e^{-\gamma z}\right)$$

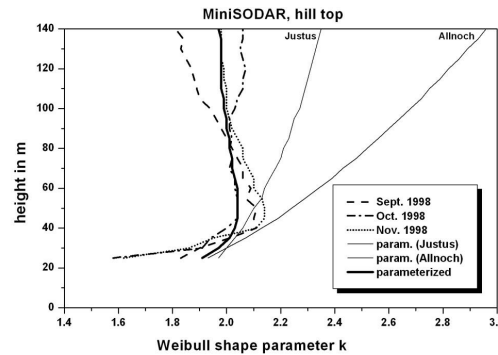
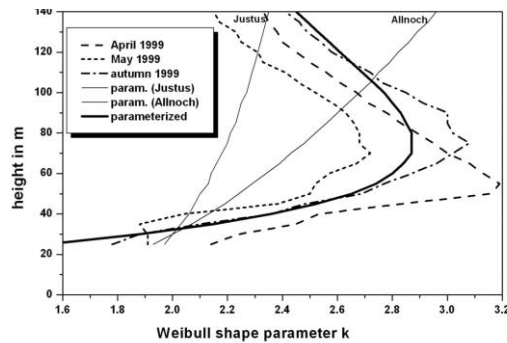
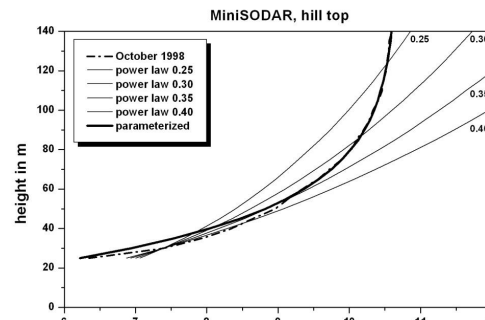
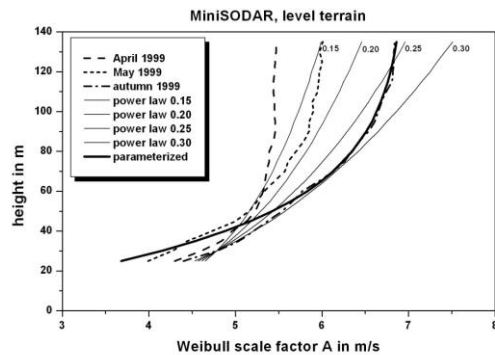
Weibull-Formparameter
($z_A = 10 \text{ m}$, $z_m = 50 \text{ m}$, $c_2 = 0.01$)

$$k(z) - k_A = c_2 (z - z_A) \exp\left(-\frac{z - z_A}{z_m - z_A}\right)$$

Wieringa (1988)

Flachland

Hügelkuppe



Skalenparameter

Formparameter

bodengebundene Fernmesssysteme

am IMK-IFU

SODAR, akustisch

Doppler-Analyse → wind, turbulence



SODAR-RASS (Doppler-RASS), akustisch, elektro-magnetische Rückstreuung, bestimmt Schallgeschw. → Wind- und Temperaturprofile



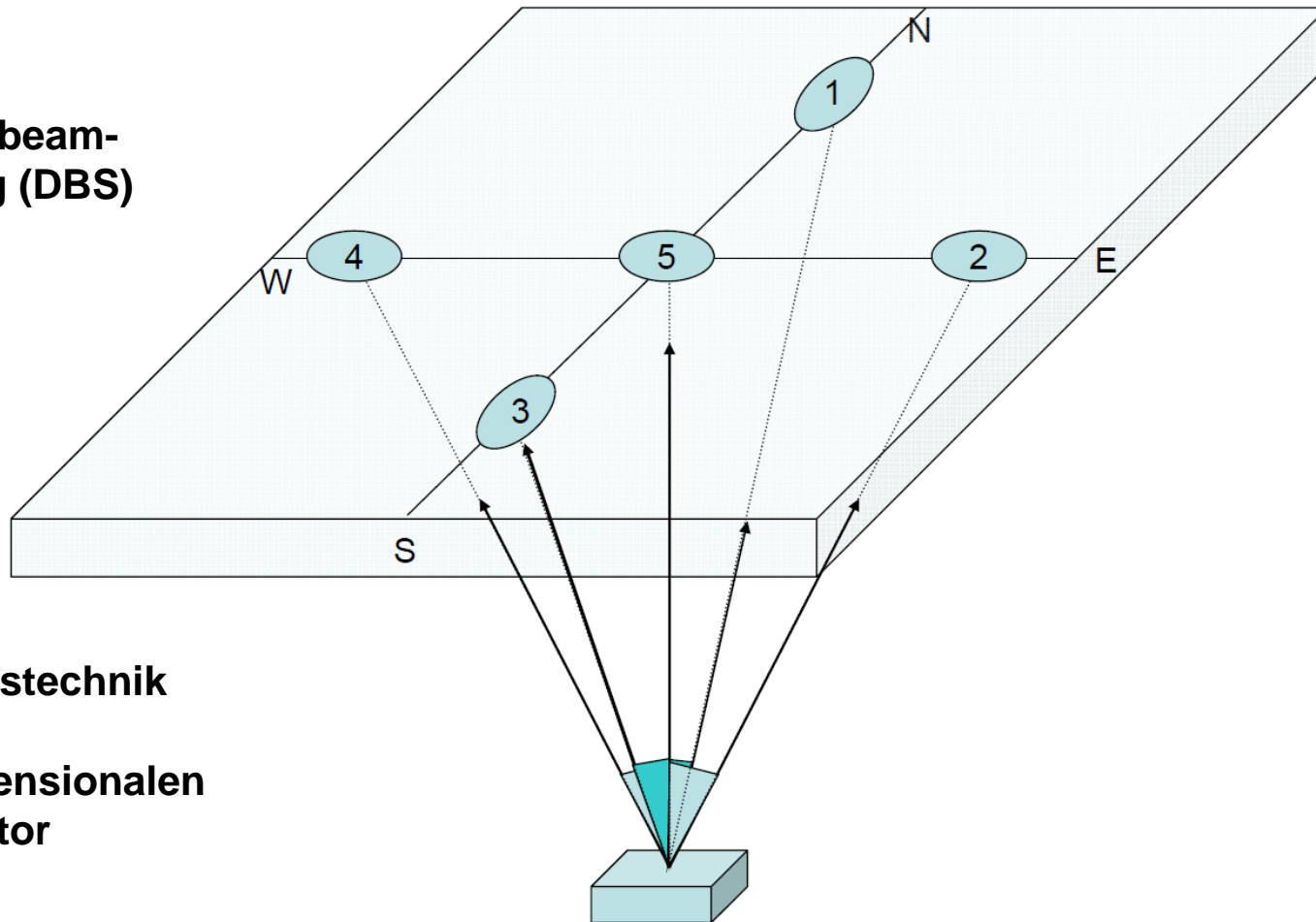
Ceilometer,
optische Pulse,
Wellenlänge $\sim 0.9 \mu\text{m}$
→ Aerosolprofile

Wind-LIDAR, optische Rückstreuung, Doppler-Analyse, Wellenlänge $\sim 1.5 \mu\text{m}$ → Wind- und Aerosolprofile

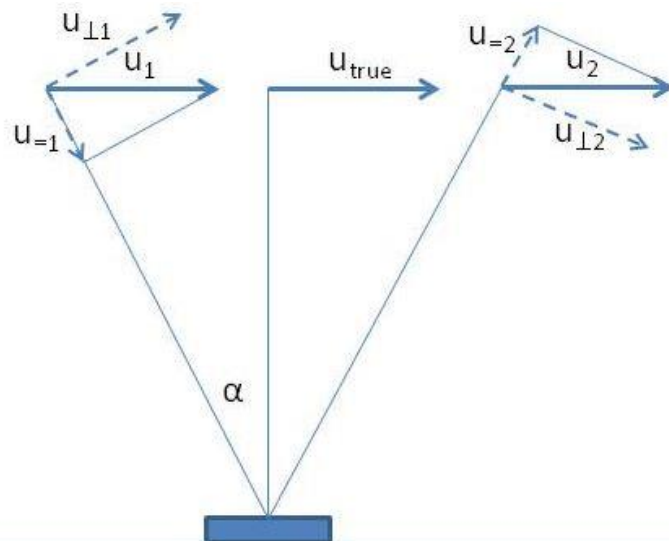


image:
Halo Photonics

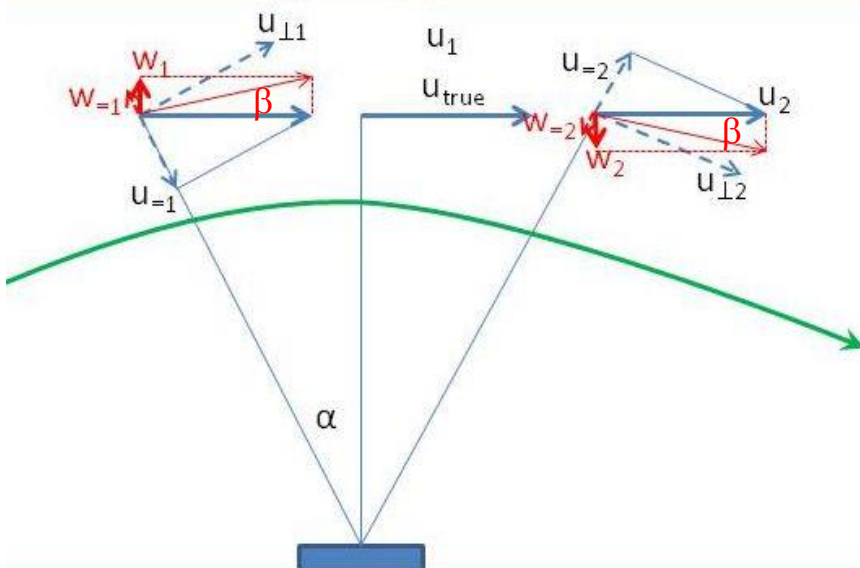
Doppler-beam- swinging (DBS)



Fernmesstechnik für den drei-dimensionalen Windvektor



Flachland



komplexes Gelände

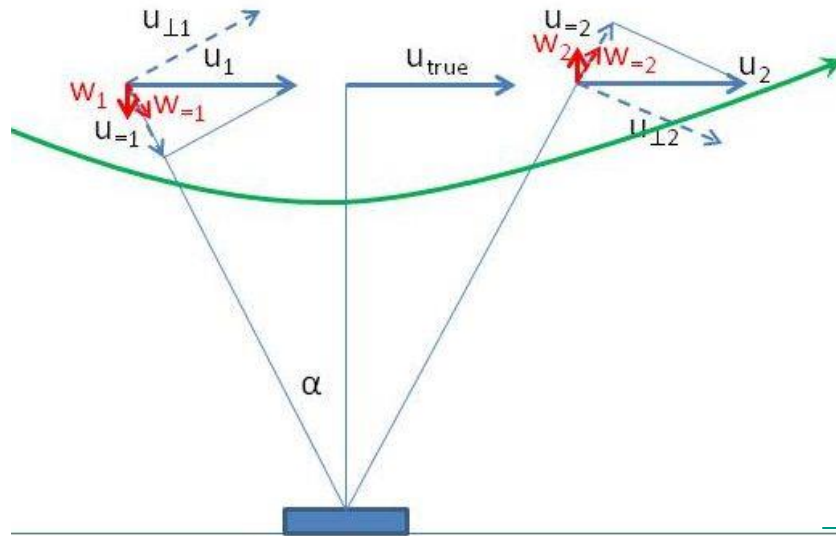
$$u_{Lidar} = u_{true} \left(1 - \frac{\sin \beta}{\tan \alpha}\right)$$

Beispiel:

$$\alpha = 15^\circ$$

$$\beta = 0.5^\circ \rightarrow \sin \beta / \tan \alpha = 0.032$$

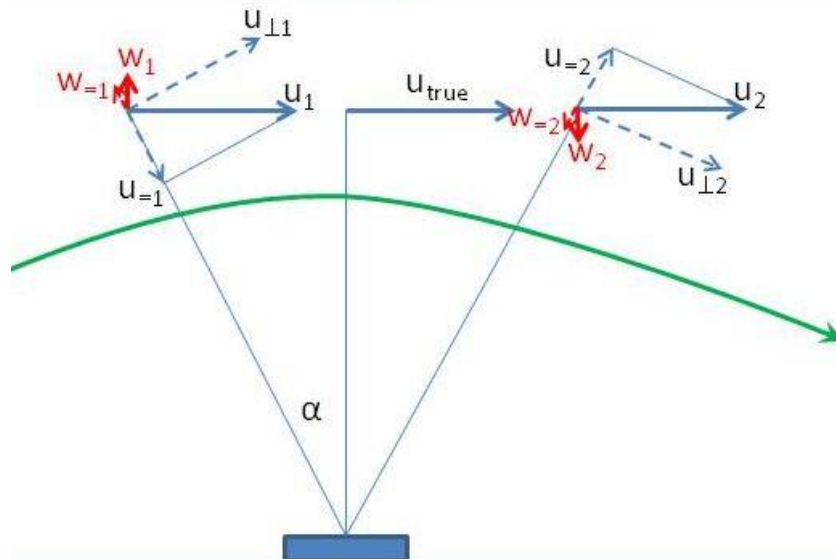
$$\beta = 5^\circ \rightarrow \sin \beta / \tan \alpha = 0.32$$



Tal:

w-Komponente kommt hinzu

→ SODAR/LIDAR misst zuviel Wind



Hügelkuppe / Pass:

w-Komponente reduziert u-Komponente

→ SODAR/LIDAR misst zu wenig Wind

Zusammenfassung zu komplexem Gelände

Windprofil

- Beschleunigung über Hügeln (stark schichtungsabhängig)
- stärkere Scherung bodennah, schwächere Scherung weiter oben
- Formfaktor der Weibull-Verteilung deutlich anders
- häufig stark windrichtungsabhängig

Windmessung

- Messungen, die auf mehreren Sondierungen in verschiedene Richtungen basieren, haben Probleme (betrifft Windlidar und Sodar)
- Repräsentativität der Messung generell schwieriger

Einfluss auf Windturbinen

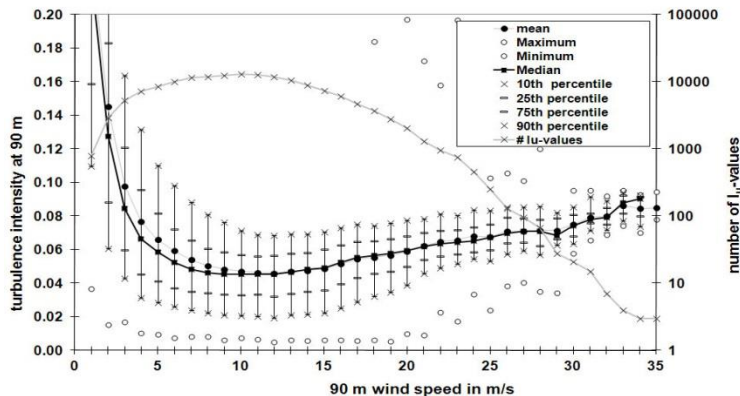
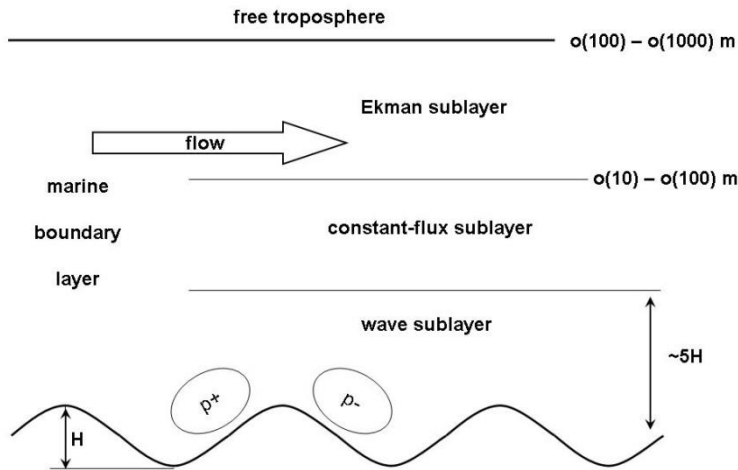
- Scherung in der Rotorebene geringer als im Flachland (zumindest bei kleineren Hügeln)
- Tagesgang anders als im Flachland (nächtliches Maximum nicht so ausgeprägt)
- stärkere Turbulenz und Rezirkulationen an steileren Geländekanten

3

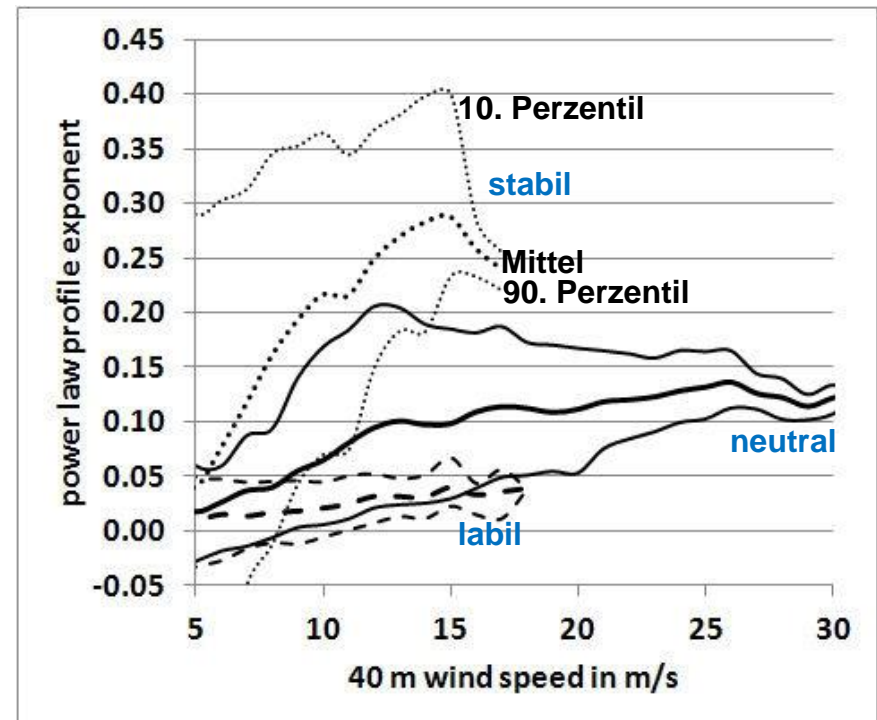
marine Grenzschicht (offshore)

Ergebnisse aus OWID, VERITAS (OWEA) und TUFFO

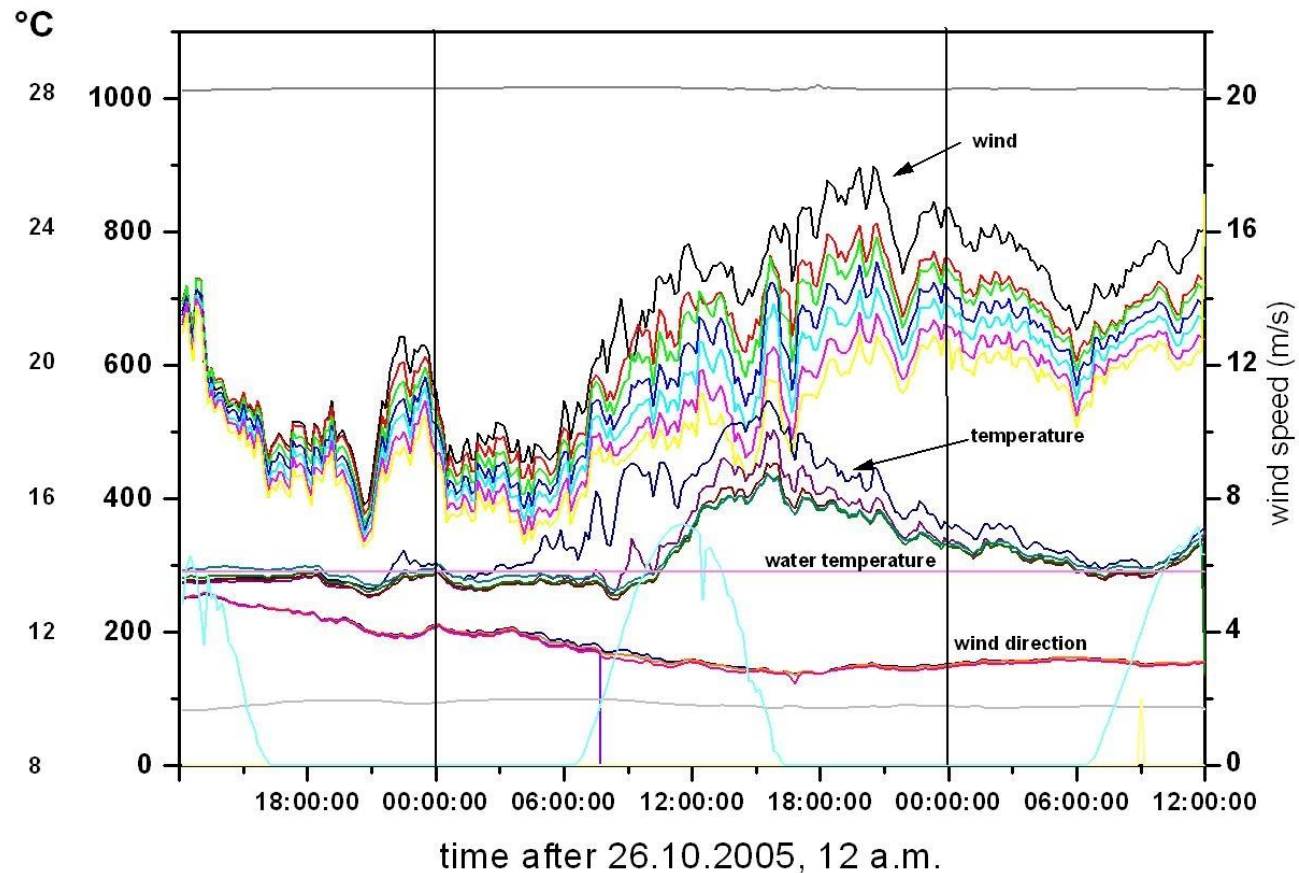
Offshore: Vertikalaufbau der Grenzschicht, Abhängigkeit der Turbulenzintensität von der Windgeschwindigkeit



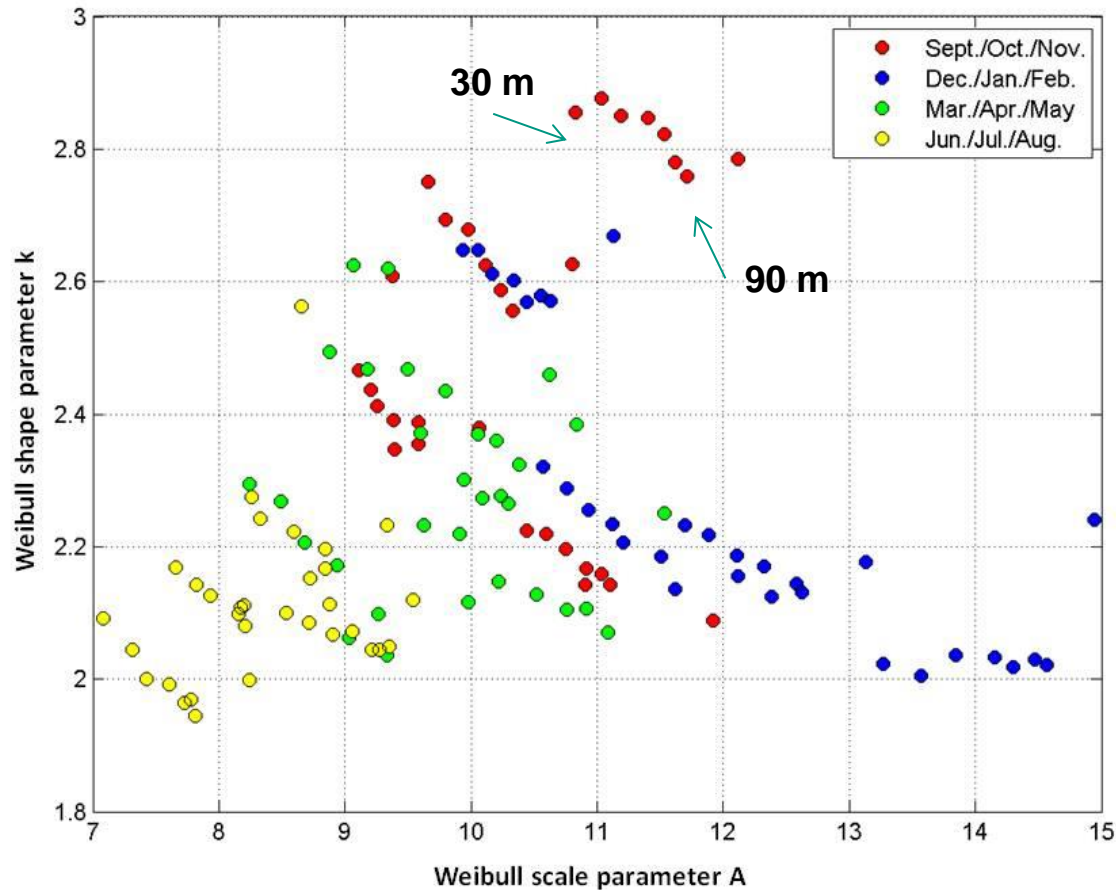
Abhängigkeit des Hellmann-Exponenten von Windgeschwindigkeit und Schichtung



Offshore: Abhängigkeit des Windprofils vom Verhältnis Wasser- zu Lufttemperatur



Offshore: Weibull-Parameter an FINO1



Quelle: Bachelorarbeit Meike Bilstein (2009), DEWI-Magazin 36 (2010)

Beschreibung der Turbulenzintensität in Normen

Normal turbulence model (NTM)

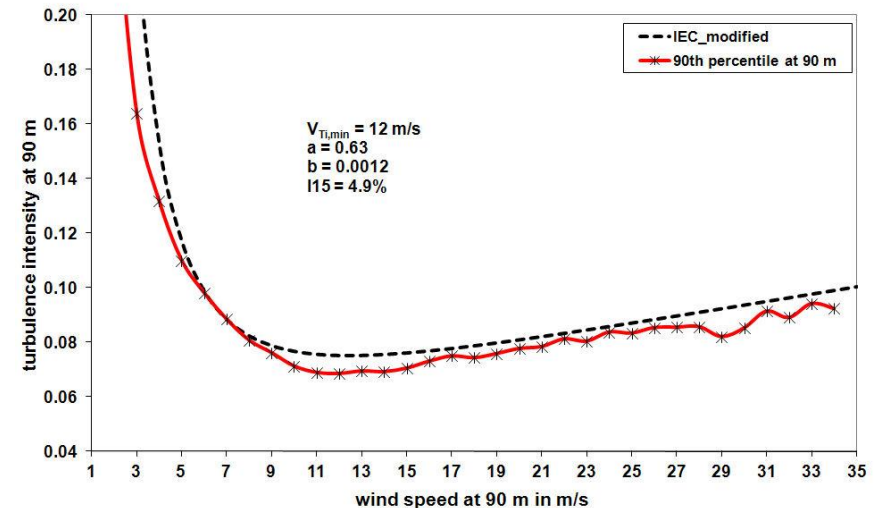
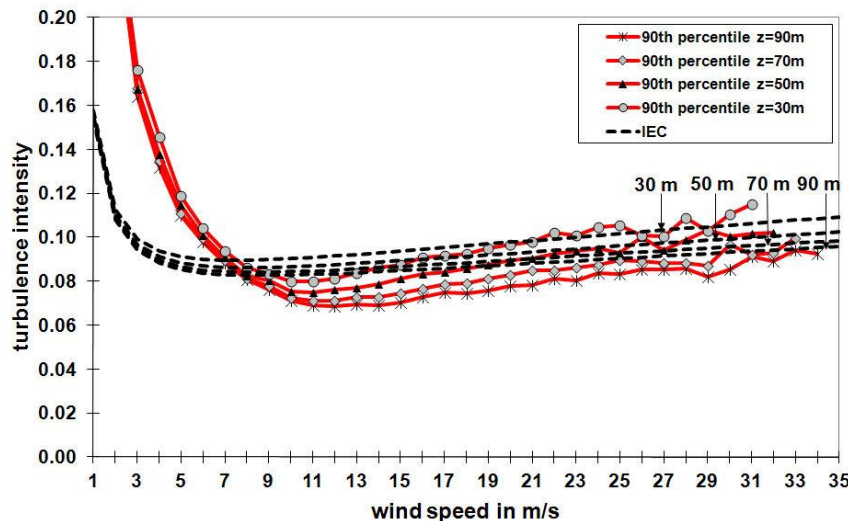
Die IEC 61400-3 (Gl. 27) fordert (T_i erhält man durch Division mit V_{hub}):

$$\sigma_{u,s} = \frac{V_{hub}}{\ln(z_{hub}/z_0)} + 1,28(1,44\text{m/s})I_{15}$$

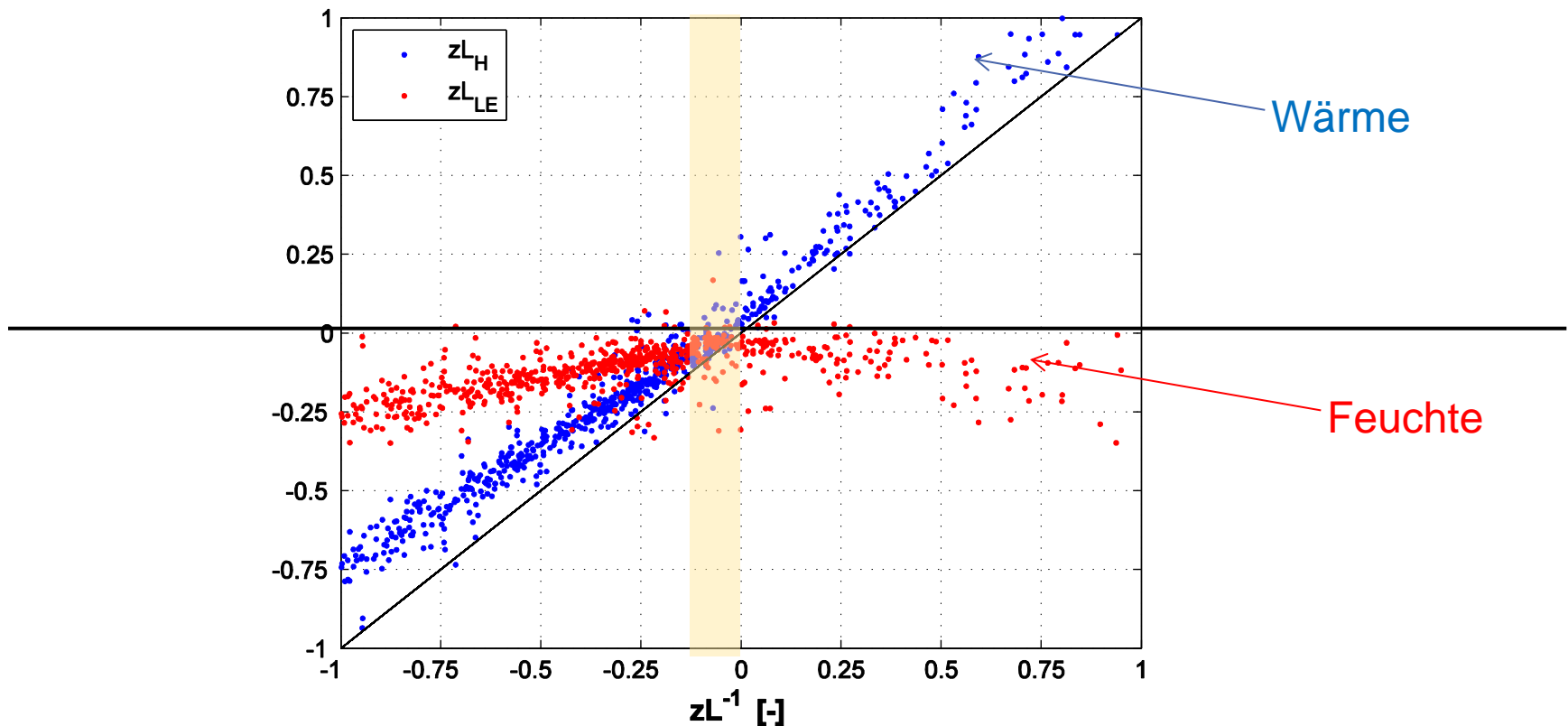
Alternativvorschlag:

$$\sigma_{u,s} = a \frac{V_{hub}}{\ln(z_{hub}/z_0)} + \frac{2V_{Ti,min}}{V_{hub}} (1,44\text{m/s})I_{15} + bV_{hub}$$

mit $a = 0,63$, $b = 0,0012$, $I_{15} = 4,9\%$ und $V_{Ti,min} = 12\text{ m/s}$ für $z_{hub} = 90\text{ m}$



offshore: Labilisierung auch durch Abnahme der absoluten Feuchte in der Vertikalen (FINO1 41,5 m-Daten für turb. Wärme- und Feuchteflüsse)

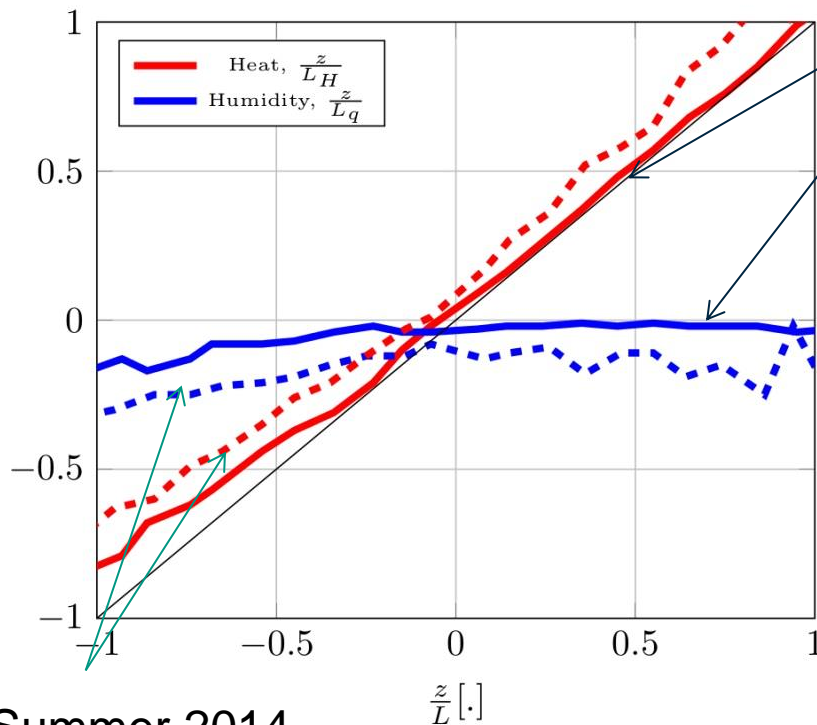


Quelle: RAVE-Projekt TUFFO, Bearbeiter: Richard Foreman

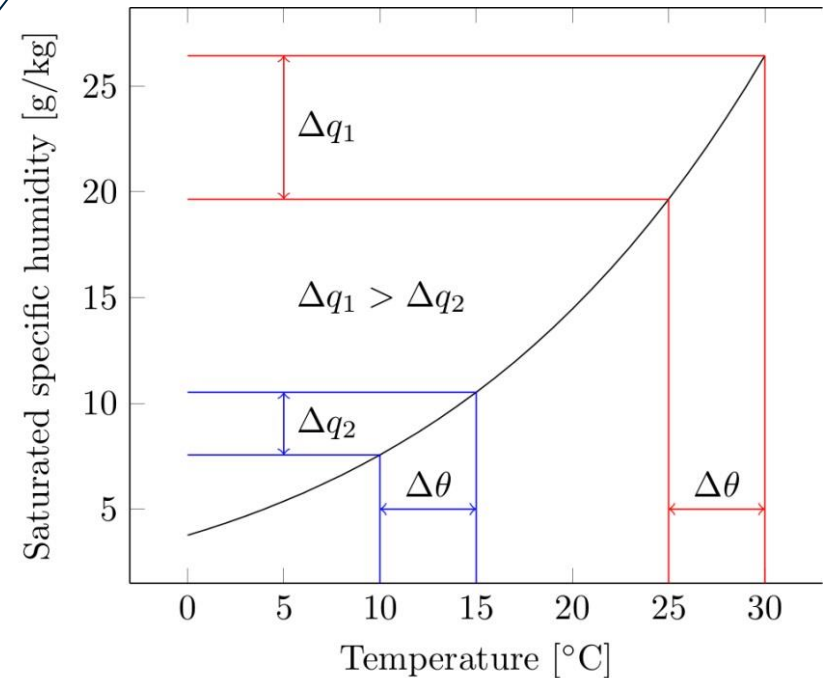
Second campaign, influence of humidity on z/L

80 m

Winter 2014



Summer 2014



$$\frac{\frac{z}{L_H}}{\frac{z}{L_{LE}}} \sim \frac{(T_{sst} - T_{air})}{(q_{sst} - q_{air})} = \frac{\Delta \theta}{\Delta q}$$

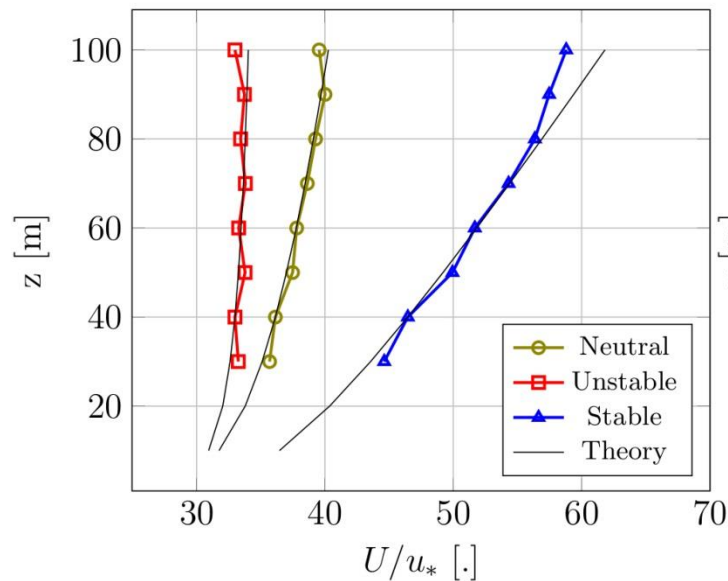
Quelle: RAVE-Projekt TUFFO, Bearbeiter: Richard Foreman

Wind Profiles at FINO1

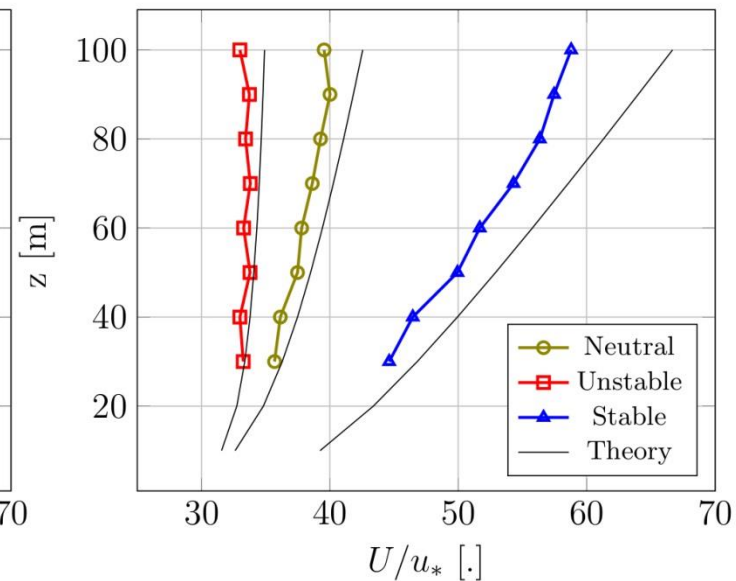
$$\frac{U}{u_*} = \left(\frac{1}{\kappa} \right) \left[\ln \left(\frac{z}{z_o} \right) + \Psi_m \left(\frac{z}{L} \right) \right]$$

$$\frac{z}{L} = -\frac{g\kappa z}{u_*^3 \theta_v} \overline{w'T'} - 0.61 \frac{g\kappa z \theta}{u_*^3 \theta_v} \overline{w'q'} = \frac{z}{L_H} + \frac{z}{L_{LE}}$$

With Humidity



Without Humidity



Quelle: RAVE-Projekt TUFFO, Bearbeiter: Richard Foreman

Zusammenfassung zur marinen Grenzschicht

Windprofil

- Prandtl-Schicht sehr flach
- Drehung in der Ekman-Schicht recht gering → Baroklinität deutlich spürbar
- Low-level jets und interne Grenzschichten bei ablandigem Wind (wärmere Luft über kälteres Wasser)
- Windscherung hängt wesentlich von der Temperaturdifferenz Luft-Wasser ab
- Feuchteprofil trägt zu Labilisierung der Luftschichtung bei

Windmessung

- FINO-Masten, Windlidar auch auf Schiffen und Bojen, SAR-Satellitenbilder

Einfluss auf Windturbinen

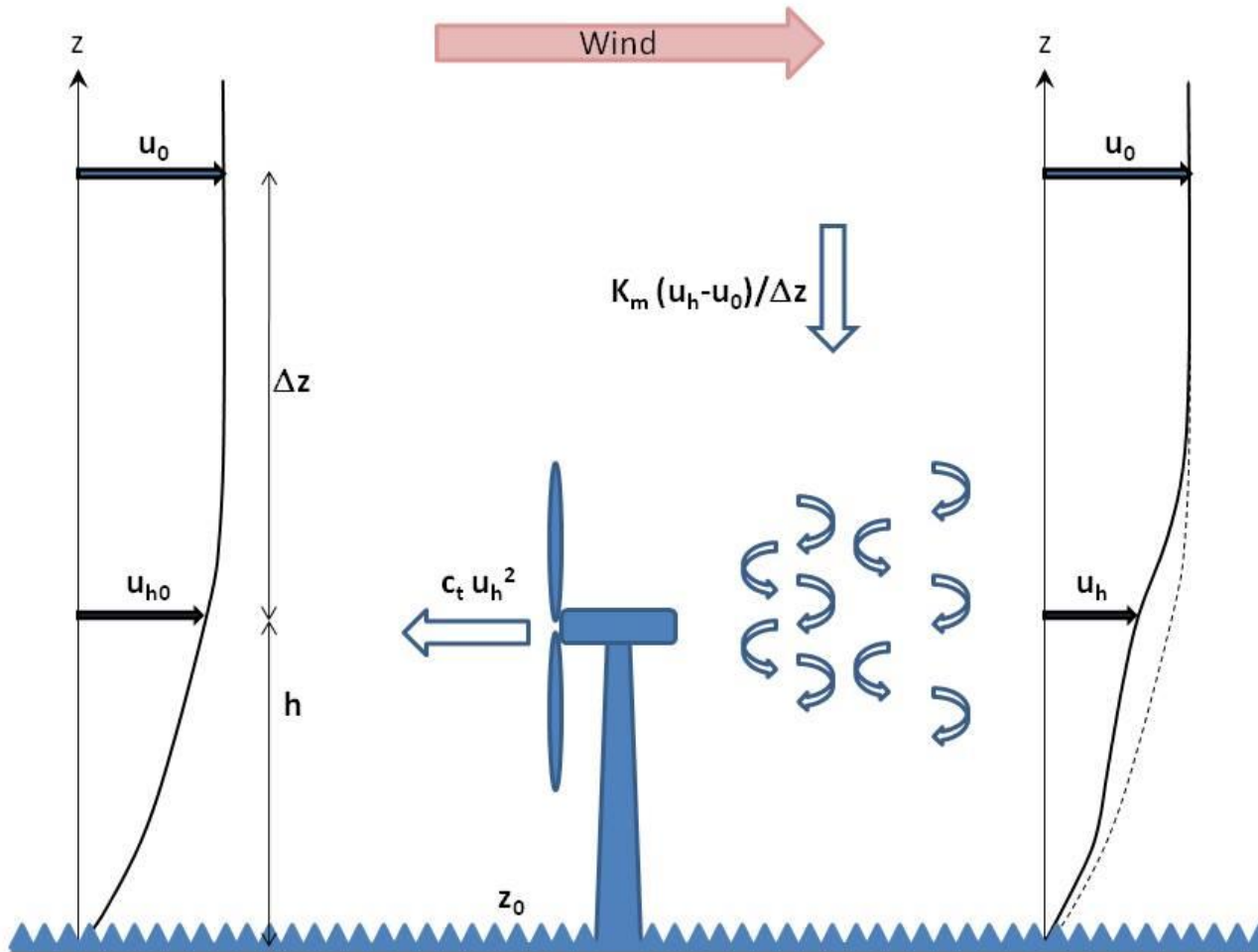
- Scherung in der Rotorebene in der Regel geringer als über Land
- Turbulenzintensität niedriger aber windgeschwindigkeitsabhängig
- Nachläufe hinter Turbinen/Parks länger

4

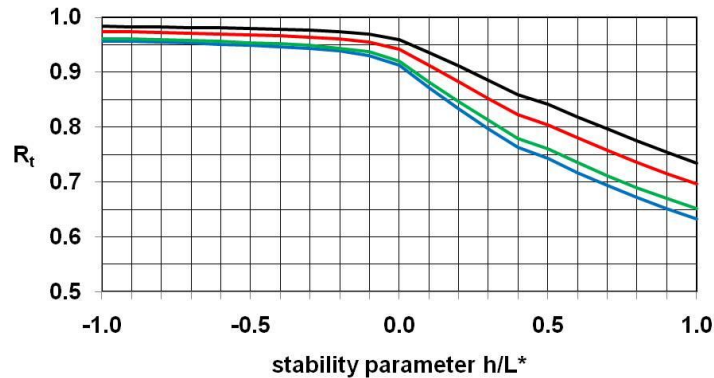
Windparkmodelle und Beobachtungen

Kapitel 6 in Emeis, S., 2012: Wind Energy Meteorology - Atmospheric Physics for Wind Power Generation. Series: Green Energy and Technology. Springer, Heidelberg etc., XIV+196 pp., 94 illus., 16 in colour, H/C, ISBN 978-3-642-30522-1

Emeis, S., 2010: A simple analytical wind park model considering atmospheric stability. Wind Energy, **13**, 459-469.

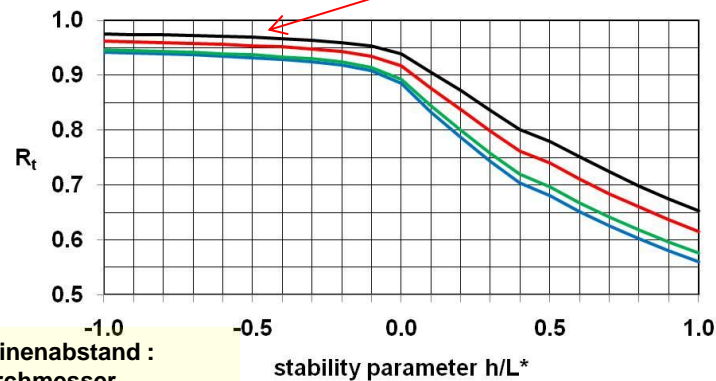


a) Reduktion der **Windgeschwindigkeit** im Parkinneren



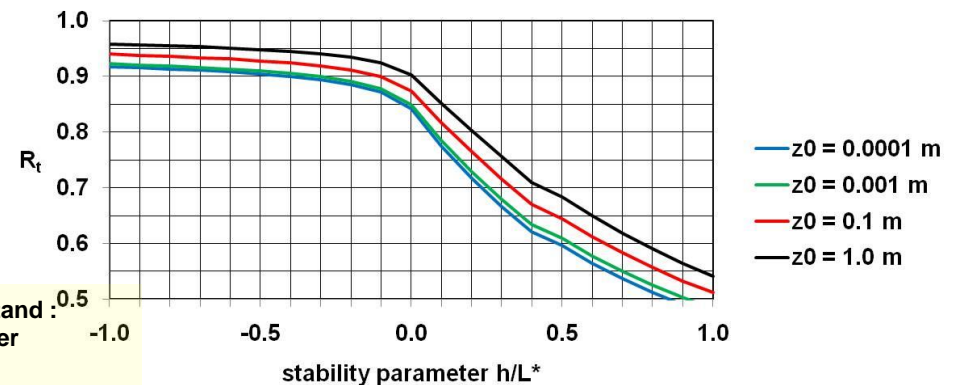
mittlerer Turbinenabstand:
10 Rotordurchmesser

→ turbineninduzierte Turbulenz 10.1%



mittlerer Turbinenabstand :
8 Rotordurchmesser

→ turbineninduzierte Turbulenz 12.6%



mittlerer Turbinenabstand :
6 Rotordurchmesser

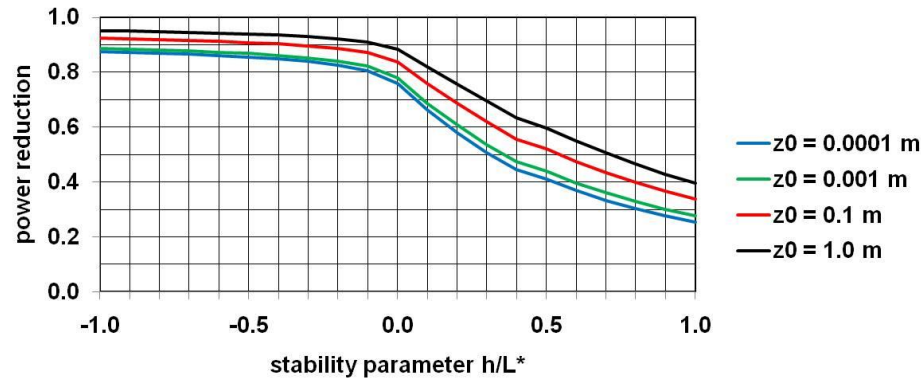
→ turbineninduzierte Turbulenz 16.8%

instabil

hohe Turbulenzintensität

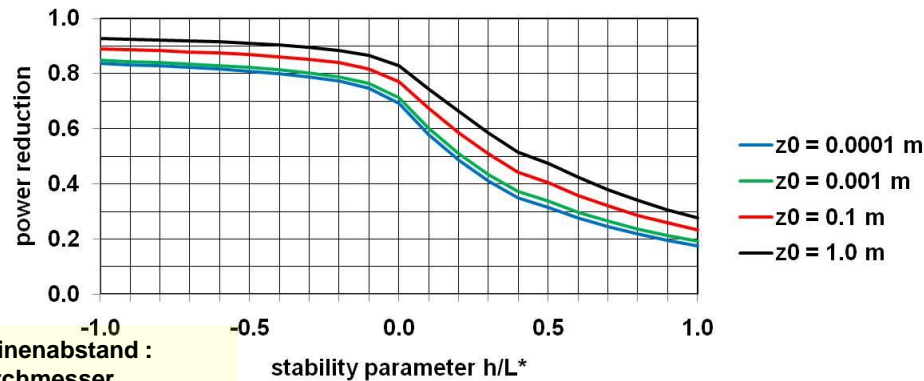
rau

Reduktion der **Windleistung** im Parkinneren



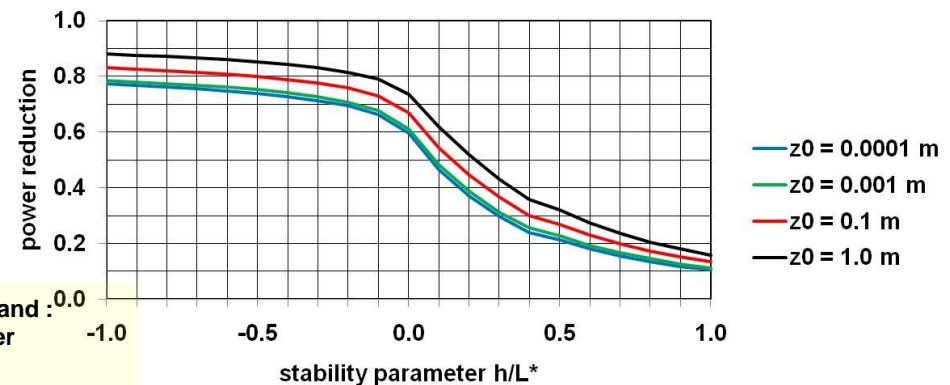
mittlerer Turbinenabstand:
10 Rotordurchmesser

→ turbineninduzierte Turbulenz 10.1%



mittlerer Turbinenabstand :
8 Rotordurchmesser

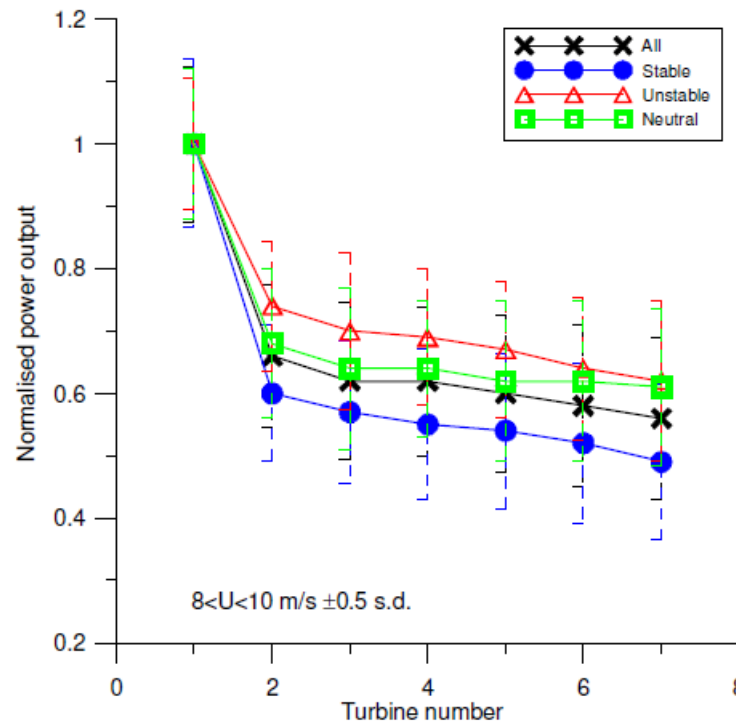
→ turbineninduzierte Turbulenz 12.6%



mittlerer Turbinenabstand :
6 Rotordurchmesser

→ turbineninduzierte Turbulenz 16.8%

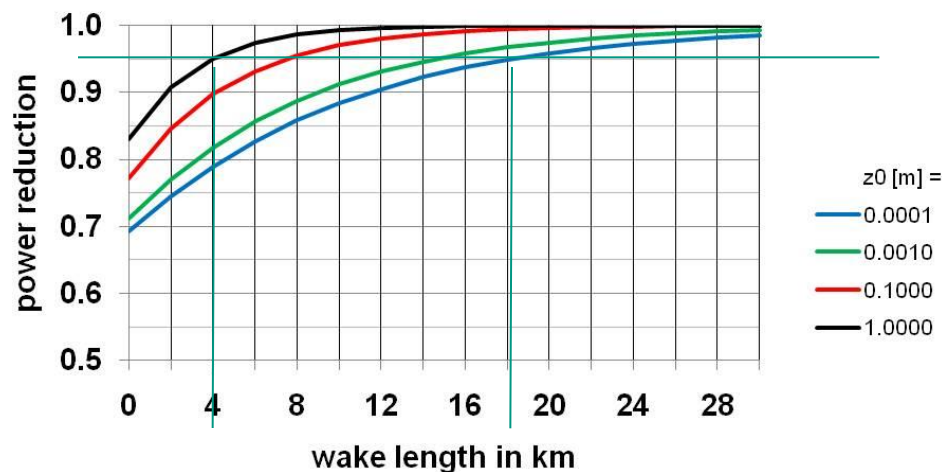
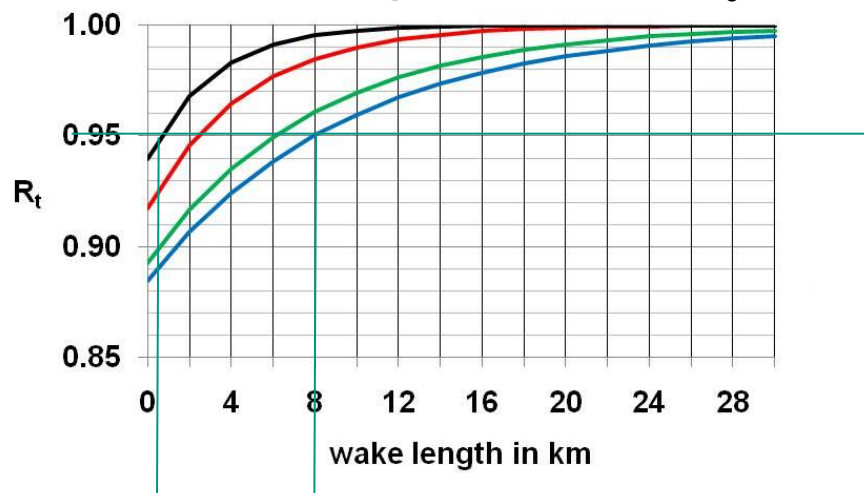
Reduktion der **Windleistung** im Parkinneren Messungen im Nysted Windpark (Ostsee)



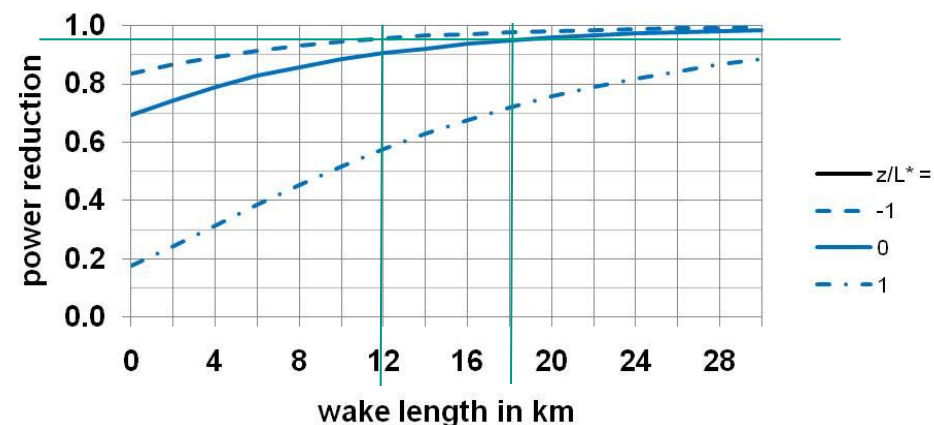
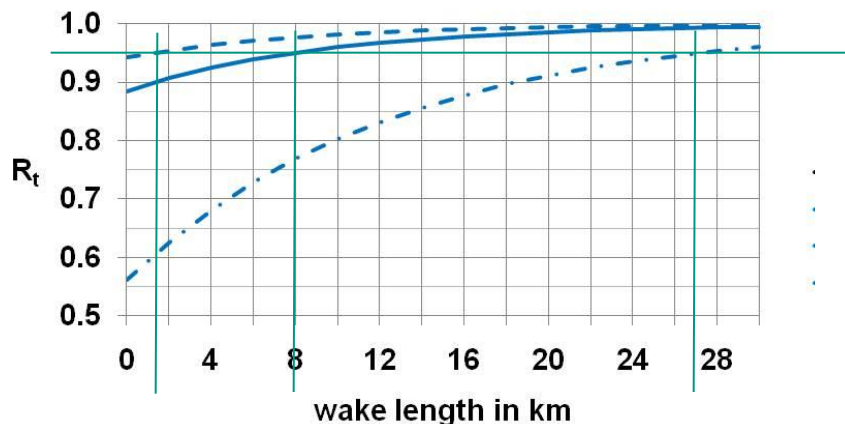
Barthelmie R, Frandsen ST, Rethore PE, Jensen L., 2007:
Analysis of atmospheric impacts on the development
of wind turbine wakes at the Nysted wind farm.
Proceedings of the European Offshore Wind Conference,
Berlin 4.-6.12.2007.

Erholung der **Windgeschw. (links)** und **-leistung (rechts)** hinter einem Windpark, mittlerer Turbinenabstand: 8 Rotordurchmesser

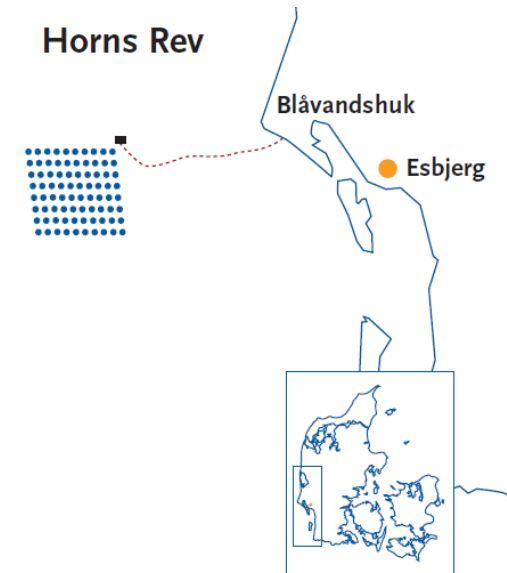
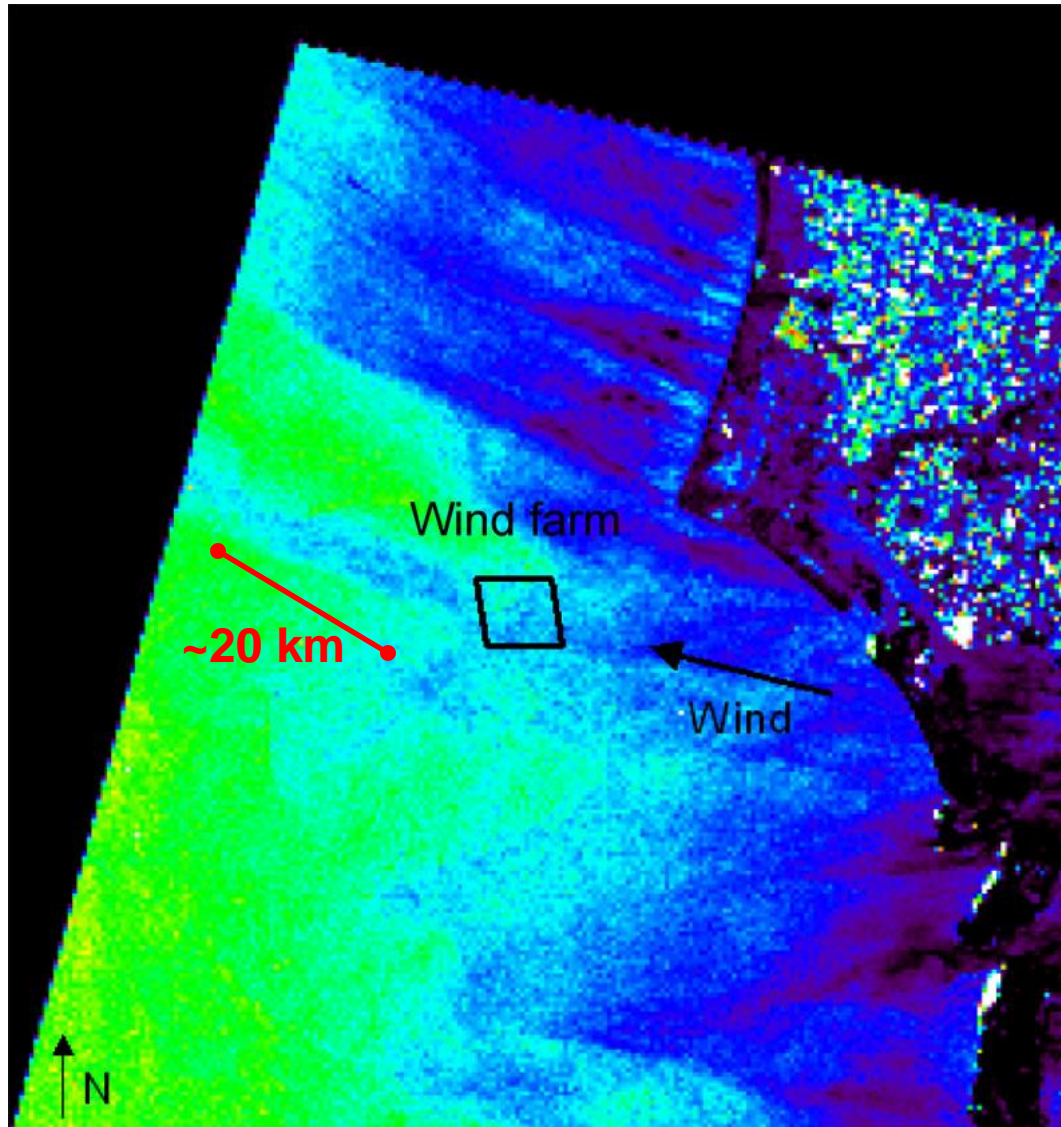
Rauigkeit: onshore ($z_0 = 1,0$ m) – offshore ($z_0 = 0,0001$ m)



Schichtung: labil ($h/L_* = -1$) – neutral – stabil ($h/L_* = 1$)



Erholung der Windgeschw. hinter einem Windpark Messungen (Envisat, SAR) am Park Horns Rev (4 km x 5 km)



http://www.hornsrev.dk/nyheder/brochurer/Horns_Rev_TY.pdf

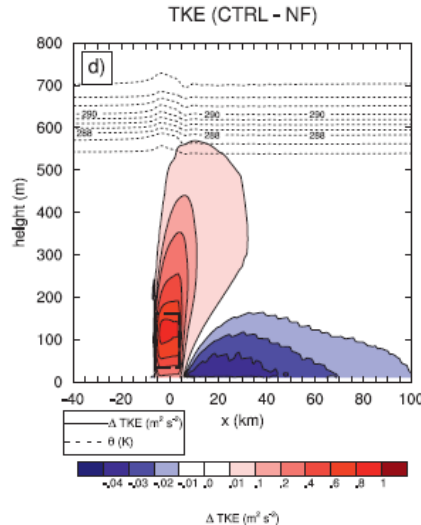
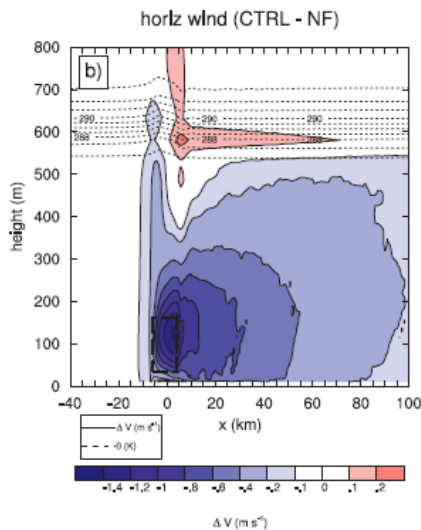
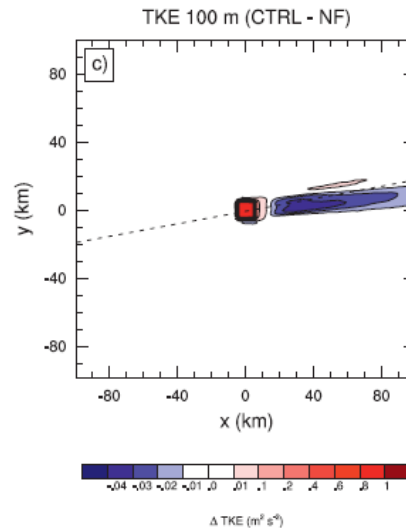
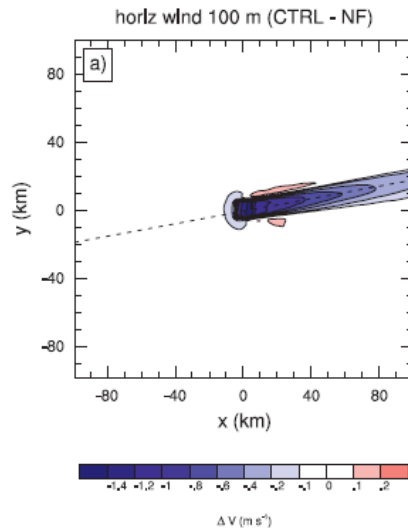
25. 02. 2003

© ERS SAR/Risø
http://galathea3.emu.dk/satelliteeye/projekter/wind/back_uk.html

Erholung der Windgeschw. und der Turbulenz hinter einem Windpark

Modellierung mit WRF

neutrale Bedingungen

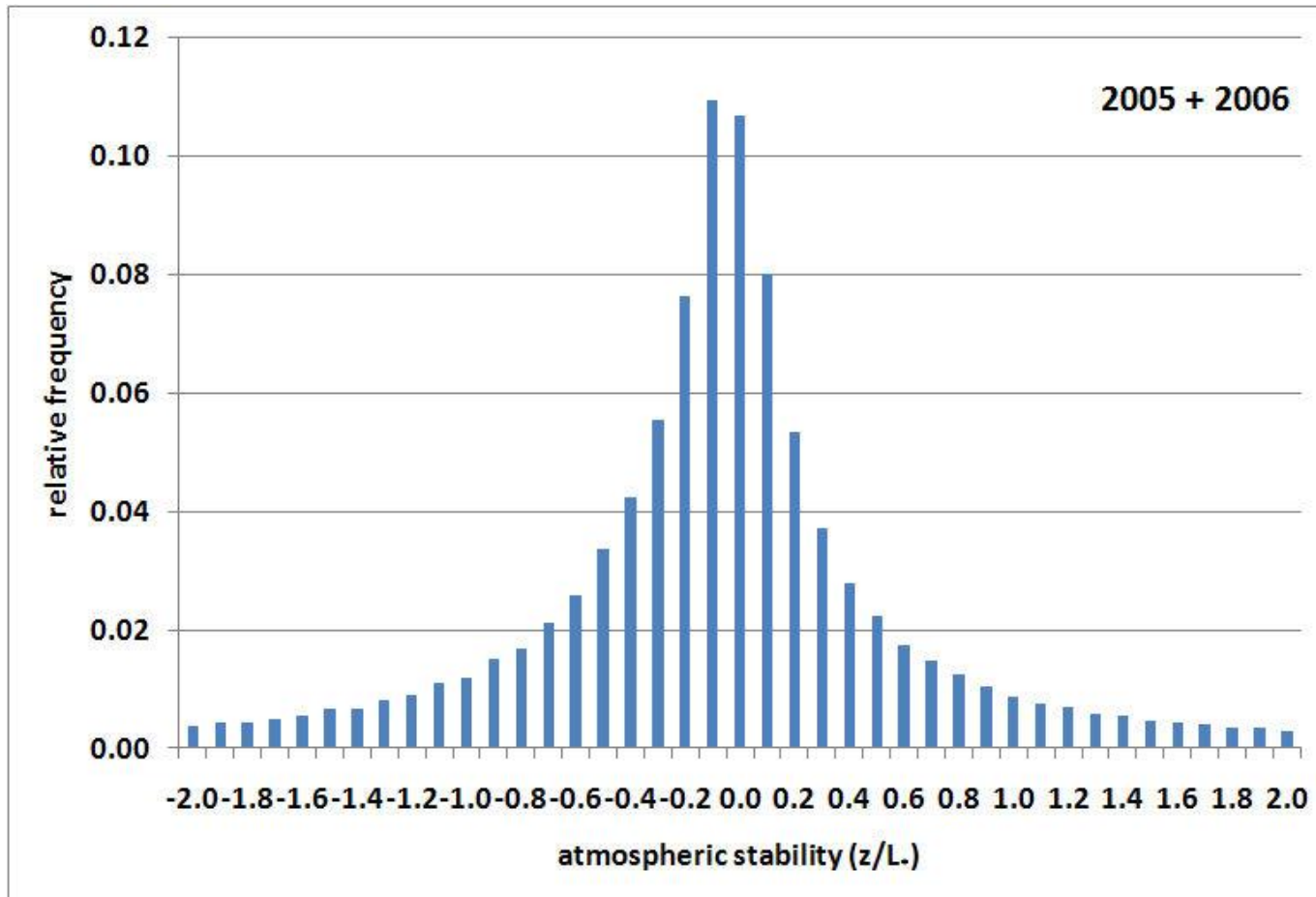


Fitch, A.C., J.B. Olson, J.K. Lundquist, J. Dudhia, A.K. Gupta, J. Michalakes, I. Barstad, 2012: Local and Mesoscale Impacts of Wind Farms as Parameterized in a Mesoscale NWP Model.

Mon. Wea. Rev., 140, 3017–3038.

doi: <http://dx.doi.org/10.1175/MWR-D-11-00352.1>

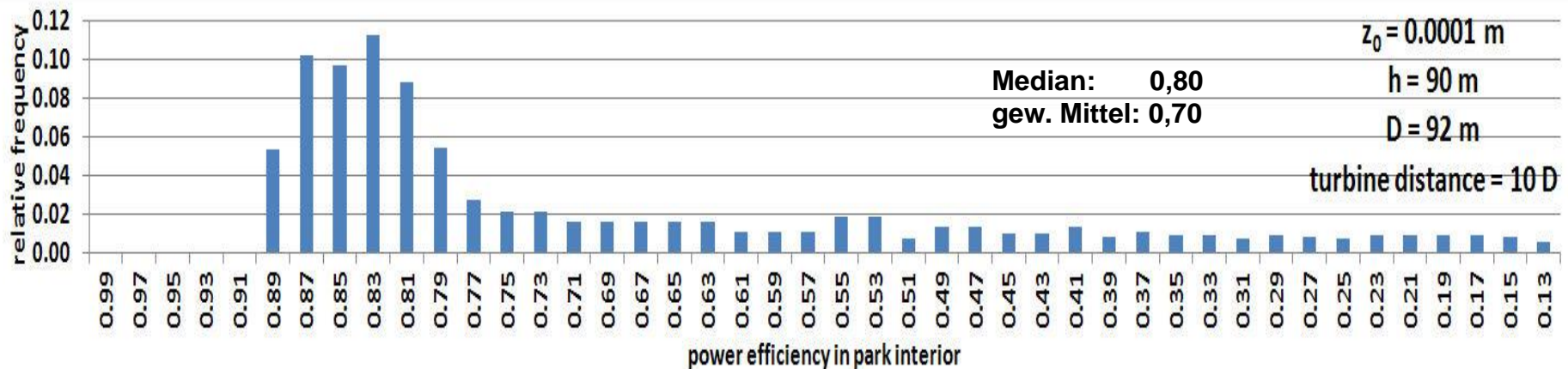
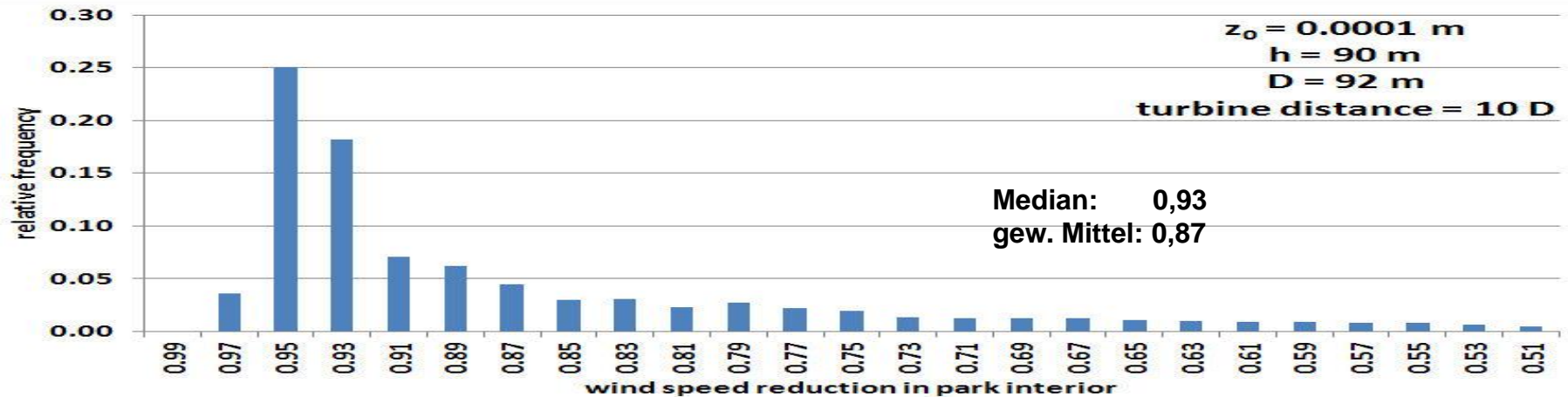
Welche Schichtungsstabilitäten treten offshore (FINO1, 80 m) wirklich auf?



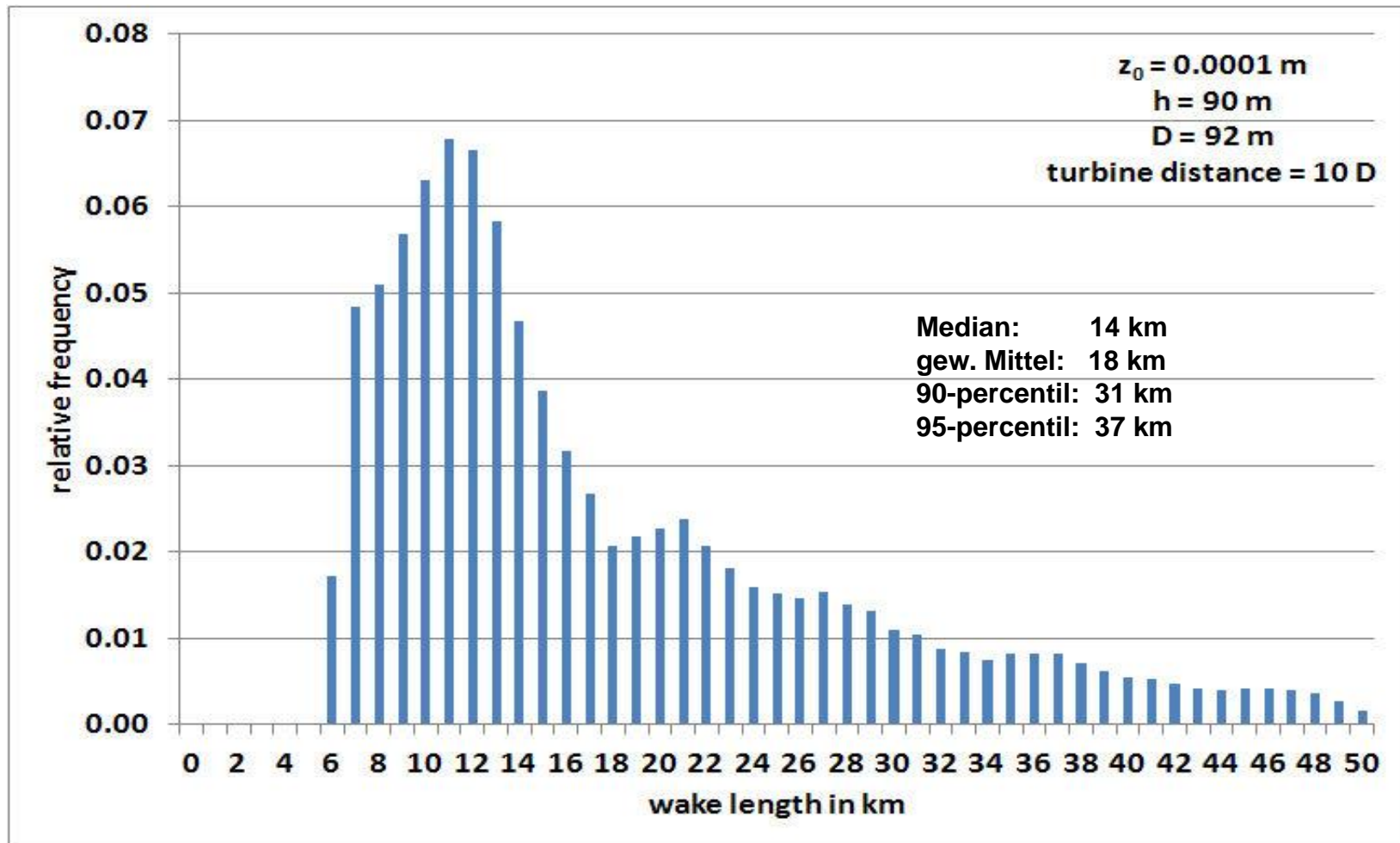
91,16%
aller
Werte

Median:
-0,07

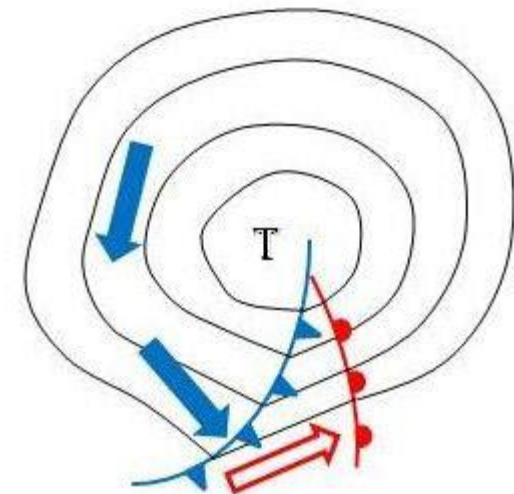
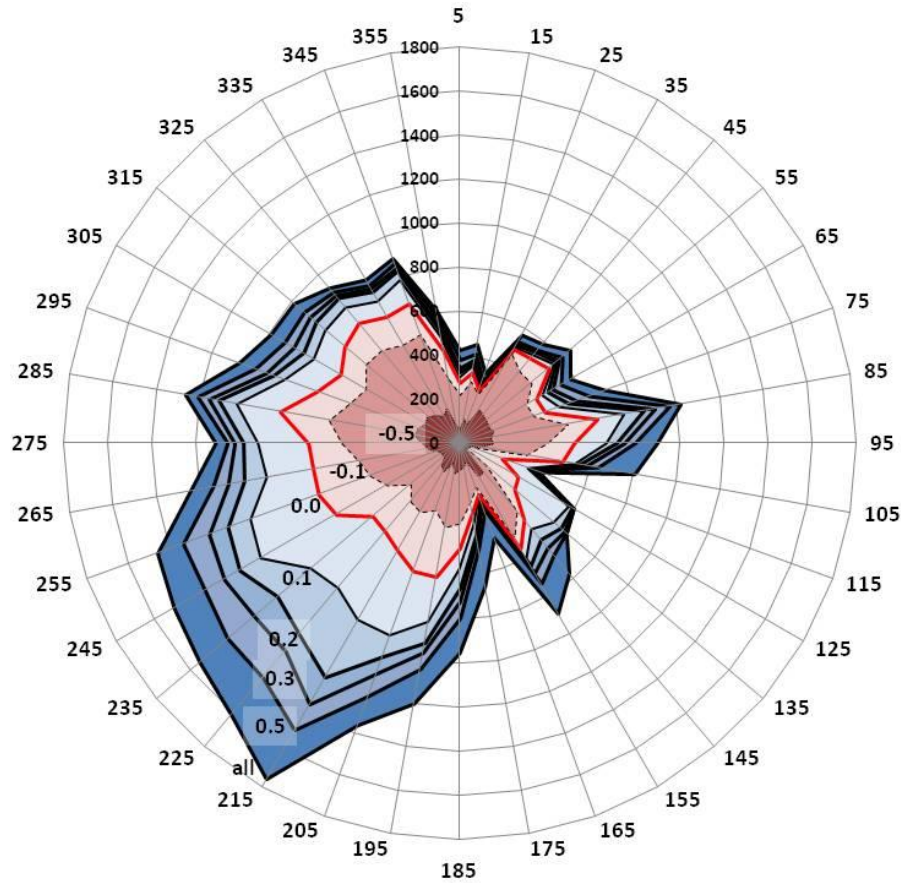
Häufigkeitsverteilung Reduktion im Windparkinneren



Häufigkeitsverteilung Nachlauflänge (<95% der Leistung)



**und darüber hinaus:
in den mittleren Breiten sind Windrichtung und Schichtung korreliert**



Windrose: FINO1, 2005, WR 80 m, Schichtung: 60 m

Schlussfolgerungen zu Windparks (allgemein):

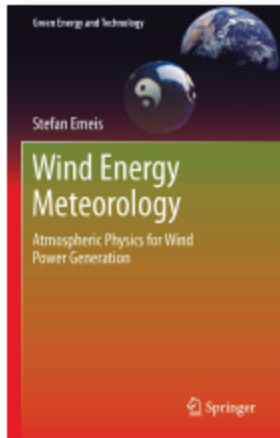
- hohe Turbulenzintensität ist
- nachteilig für Lasten auf einzelne Windturbinen
- vorteilhaft bei größeren hintereinanderliegenden Windfarmen

Schlussfolgerungen zu Offshore-Windparks:

- thermische Stabilität der Luftschichtung wichtig
- Korrelation Windrichtung-Schichtung sollte Parkplanung beeinflussen
- größere Abstände als an Land notwendig

Generelle Schlussfolgerungen

- vertikale Profilgesetze müssen erweitert werden
- Schichtung und low-level jets sorgen für nächtliche Ertragsmaxima
- Vertikalprofile über Hügeln und Bergen anders als im Flachland
- Fernmesstechnik hat Probleme in komplexem Gelände
- thermische Stabilität über See charakteristisch anders
- offshore-Rauigkeit windgeschwindigkeitsabhängig
- geringe offshore-Turbulenzintensität erfordert größere Abstände zwischen Turbinen und ganzen Windparks



2013, 2013, XIV, 196 p. 94 illus., 16 in color.

Printed book

Hardcover

- ▶ 99,95 € | £90.00 | \$129.00
- ▶ *106,95 € (D) | 109,95 € (A) | CHF 133.50

S. Emeis, Karlsruher Institut für Technologie, Garmisch-Partenkirchen, Germany

Wind Energy Meteorology

Atmospheric Physics for Wind Power Generation

- ▶ **First book devoted solely to the meteorological basics of wind power generation**
- ▶ **Presents the meteorological basics for large wind turbines and wind parks**
- ▶ **Gives guidance to plan offshore wind parks**

This book is intended to give an introduction into the meteorological boundary conditions for power generation from the wind, onshore and offshore. It is to provide reliable meteorological information for the planning and running of this important kind of renewable energy. This includes the derivation of wind laws and wind profile descriptions, especially those above the logarithmic surface layer. Winds over complex terrain and nocturnal low-level jets are considered as well. A special chapter is devoted to the efficiency of large wind parks and their wakes.



**Vielen Dank für
Ihre
Aufmerksamkeit**